

República de Cuba  
Ministerio de Educación Superior  
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa  
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”  
Departamento de Metalurgia Electromecánica

# Trabajo de Diploma

*En opción al Título de Ingeniero Mecánico*

*Título: Determinación de tensiones residuales en piezas simétricas rotativas deformadas por rodillo simple*

*Autora: Esther Fernández Guilarte*

*Tutor: Dr. C. Tomás Fernández Columbié.*

*Moa /2012*

*“Año 54 de la Revolución”*



## **Declaración de Autoridad**

**Yo:** Esther Fernández Guilarte

Autor de este trabajo de diploma, certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez", el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

-----  
Esther Fernández Guilarte

-----  
Dr. C. Tomás H. Fernández Columbié



## **Agradecimientos**

***A todos mis profesores por los conocimientos transmitidos durante el desempeño de mi carrera.***

***A mi tutor por confiar en mí en la realización de este trabajo, el Dr. C. Tomás Fernández Columbie.***

***A mis familiares que me apoyaron en los momentos de mi vida en que más lo necesitaba.***

***A mis amigos que siempre creyeron en mí.***

***A los que de una forma u otra me apoyaron y ayudaron en la realización de este trabajo.***

***A la revolucion, por darme la oportunidad de convertirme en profesional .***

***A todos***

***Muchas Gracias.***



## **Dedicatoria:**

**Quiero dedicar este trabajo a mis familiares.**

**A mi madre María Esther Guilarte Áreas, que  
siempre estuvo presente en todos los  
momentos de mi vida.**

**A mi padre Tomás Hernaldo Fernández  
Columbié.**

**A mis Hermanos Katuska, Aliana, Eneyda y  
Hernaldo.**

**A mis sobrinos Rachelis, Osmani, Keyla y  
Katherine.**

**A mi hija Nathalie, que le sirva de ejemplo.**

**A mí querido y estimado esposo, Roberto  
Almaguer Escobar, por su ayuda y  
comprensión**

**A mis amigos.**

**A nuestra revolución, por las posibilidades  
que me ofrece.**



### Resumen

En el trabajo se analiza la variación del diámetro de la pieza, los radios del rodillo y la profundidad de la capa endurecida para analizar el comportamiento que tienen las tensiones sobre la dureza de la capa superficial del acero AISI 1045 después de haber sido sometido a un proceso de deformación plástica por rodillo simple. A partir de la metodología de cálculo propuesta para determinar los regímenes de elaboración, luego de realizados los cálculos, se establece a través de análisis estadísticos el comportamiento de las tensiones, empleando para ello el tabulador Microsoft Excel 2007, el paquete estadístico STATGRAPHICS Plus 5.1 y el ANSYS. Los resultados obtenidos demuestran el incremento de las tensiones bajo la capa deformada según se varían los parámetros analizados. Se establece el análisis económico, así como el impacto medio ambiental.



### Abstract

In the paper the variation of the diameter of the piece is analyzed, the radii of the roller, the depth of the hardened layer to analyze the behaviour that they have the tensions about the hardness of the superficial layer of the steel AISI 1045 after having been subjected to a process of plastic deformation for simple roller. Starting from the calculation methodology proposed to determine the elaboration regimens, after having carried out the calculations the behaviour of the tensions he settles down through statistical analysis, using for it the tabulator Microsoft Excel 2007, the statistical package STATGRAPHICS PLUS 5.1 and the ANSYS. The obtained results demonstrate the increment of the tensions under the deformed layer as the analyzed parameters are varied. The economic analysis settles down, as well as the half environmental impact.



ÍNDICE	PÁG
<b>INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS</b>	
1.1. Introducción	5
1.2. Endurecimiento en frío	5
1.3. Tendencia del proceso de deformación plástica superficial por rodillo	6
1.4. Tensiones residuales en materiales deformados	12
1.5. Tensiones en los procesos de deformación plástica superficial	13
1.6. Estado de tensión en la zona de contacto con la superficie deformada	15
1.7. Método estadístico en los diseño de experimentos	18
1.7.1. Análisis de varianza	18
1.7.2. Análisis de regresión	19
1.7.3. Métodos experimentales para estudiar la deformación plástica	19
1.8. Método de los Elementos Finitos	20
1.8.1. Discretización espacial	22
1.9. Conclusiones del capítulo 1	23
<b>CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS</b>	
2.1. Introducción	24
2.2. Características de la herramienta para la deformación plástica por rodillo	24
2.2.1. Control del diámetro de la pieza	26
2.2. Análisis microestructural	27
2.3. Diseño de experimentos	27
2.4. Metodología para la deformación plástica superficial por rodillo	28
2.5. Métodos de los elementos finitos	31
2.6. Conclusiones del capítulo 2	34
<b>CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS</b>	
3.1. Introducción	35
3.2. Análisis del diámetro antes y después del proceso de deformación	35
3.3. Parámetros de deformación plástica superficial por rodillo	36
3.3.1. Análisis de las tensiones de proporcionalidad	36



3.3.2. Comportamiento de las tensiones con relación a los radios	39
3.3.3. Profundidad de la capa endurecida	41
3.3.4. Comportamiento de las tensiones máximas	42
3.3.5. Tensiones máximas de aplastamiento	44
3.4. Resultados de la simulación por el Método de los Elementos Finitos	45
3.5. Valoración económica	47
3.6. Valoración del impacto ambiental	48
3.7. Conclusiones del capítulo 3	50
CONCLUSIONES GENERALES	
RECOMENDACIONES	
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	
ANEXOS	



## INTRODUCCIÓN

El progreso de la ciencia de materiales y la tecnología de la deformación plástica, en las últimas dos décadas, así como el desarrollo de procesos avanzados con el empleo de rodillo simple, permite obtener capas de variada profundidad y buenas propiedades.

La aplicabilidad y utilidad de un acero estarán determinadas en muchos casos por su resistencia y tenacidad. La resistencia (ligada a su comportamiento plástico, definido por límite elástico y la capacidad de deformarse plásticamente) y la tenacidad que presenta un acero (dada por la capacidad de relajar tensiones, deformándose plásticamente antes de la fractura), no son variables independientes.

Estas propiedades quedan caracterizadas por una serie de variables macroscópicas que se pueden medir de forma reproducible siguiendo las normas creadas para los ensayos de los que se obtienen. Pero la aproximación macroscópica es insuficiente, ya que no aporta información alguna respecto a los procesos locales que se desarrollan en el material. Es imprescindible el entendimiento a nivel microestructural que permita definir cuales son los factores que conducen a niveles de resistencia tenacidad mayores.

Debido a las nuevas exigencias de calidad y velocidad de la producción en la industria, son cada vez mayores los requerimientos sobre los materiales involucrados en los procesos productivos. Los nuevos materiales no solo deben demostrar buenas propiedades particulares, sino que deben conjugar características sobresalientes de distintas naturalezas, ya sean mecánicas, eléctricas, magnéticas, ópticas u otras.

El material más usado para aplicaciones como la antes mencionada es el acero AISI 1045 (Guliaev, 1983; DeLitizia, 1984), el cual presenta una excelente conductividad eléctrica y relativamente bajo costo. Al ser sometido a proceso de compresión alcanza magnitudes de dureza de 56 a 58 HRC (Lajtin, 1973 y Prevey, 2001), es un material adecuado para ejes, árboles, pasadores, tornillos (Bengton, 1991 y Várela, 2003).



Los modernos sistemas industriales, con sus exigencias y economía, por una parte, las nuevas técnicas de fabricación para reducir costos y mejorar la calidad, por otra, obligan a tener en cuenta una serie de características en el momento de la elección de materiales y de los procesos mecánicos-metalúrgicos a seguir en las piezas o mecanismos que integran estos sistemas.

La mayor parte de las piezas que componen las máquinas y motores, se fabrican de forma que sus propiedades mecánicas sean bastante uniformes en toda la masa. Sin embargo, en ciertos mecanismos es necesario que algunas piezas tengan superficies muy duras o resistentes al desgaste y a la penetración y el núcleo central muy tenaz, para poder soportar los choques a que están sometidas.

Los procedimientos más usados en la actualidad para conseguir estas características, gran dureza y mucha tenacidad, al parecer opuestas entre sí, son los siguientes: la cementación, la cianuración, la carbonitruración, la nitruración, la sulfinitización, el temple local, el depósito por soldadura de delgadas capas superficiales de acero de elevado contenido de carbono.

La **Situación Problémica** de la investigación la constituye:

La preparación de materiales para partes de máquinas que están sujetas a requerimientos de resistencia al desgaste, al impacto, requiere la aplicación de un tratamiento superficial para la mejora de las propiedades como por ejemplo la reducción del desgaste y resistencia a la fricción. Dentro de este contexto, un factor importante es la anisotropía inducida por deformación. Los procesos de conformado que implican deformación plástica del material en frío producen un alineamiento de los ejes cristalográficos de los granos en una orientación preferente, es decir, una textura cristalográfica. Se produce también un cambio en la orientación de la microestructura, de manera que resultan granos no equiaxiales, lo cual es motivado por las tensiones internas dentro del material.

El **Problema** a investigar lo constituye

Aún son insuficientes los estudios realizados acerca de las tensiones que originan el endurecimiento de la capa superficial, así como el comportamiento de la microestructura en consideración con el Método de los Elementos Finitos (MEF),



cuando el acero AISI 1045 es sometido a proceso de deformación plástica superficial con el empleo de rodillo simple.

Como **objeto de la investigación** se establece

Comportamiento macro y microestructural del acero AISI 1045.

### **Campo de acción**

Determinación de las tensiones superficiales y las regularidades del comportamiento microestructural en base al empleo del Método de los Elementos Finitos del acero AISI 1045 deformado en frío por rodadura.

Sobre la base del problema a resolver se establece la siguiente **hipótesis**

Si se conoce la variación del diámetro de la pieza, los radios del rodillo y la profundidad de la capa endurecida, se podrá conocer la influencia de las tensiones sobre la dureza de la capa superficial del acero AISI 1045 deformado por rodillo simple.

A partir de la hipótesis planteada, se define como **objetivo del trabajo**

Determinar a través de la variación del diámetro de la pieza, los radios del rodillo y la profundidad de la capa endurecida, la influencia de las tensiones sobre el endurecimiento superficial del acero AISI 1045 deformado por rodillo.

Y se definen los siguientes **objetivos específicos**

1. Caracterizar los parámetros tecnológicos y estructurales que influyen en el comportamiento macro y microestructural del acero AISI 1045 deformado por rodillo.
2. Determinar las tensiones que surgen en el proceso de deformación plástica como consecuencia de la compresión dinámica que se aplica sobre la superficie.
3. Establecer a partir de las tensiones obtenidas por el Método de los Elementos Finitos el comportamiento microestructural del acero AISI 1045 deformado por rodadura.



Para lograr el cumplimiento del objetivo propuesto, se plantean las siguientes **tareas de trabajo**

1. Establecimiento del estado del arte y sistematización de los conocimientos y teorías relacionadas con el objeto de estudio.
2. Establecer a través de la metodología empleada para la deformación plástica superficial por rodillo los regímenes y la incidencia de las tensiones sobre el endurecimiento superficial del acero AISI 1045.
3. Fundamentación de la influencia de las tensiones sobre el endurecimiento superficial del acero AISI 1045 deformado por rodadura.
4. Planteamiento de los efectos económicos, sociales y ambientales del proceso de deformación en frío por rodillo.

# Capítulo 1

## Marco teórico de la investigación



## **CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS**

### **1.1. Introducción**

La elección del mejor tratamiento superficial depende del comportamiento de muchos factores, como son las propiedades de difusión del material, las condiciones de trabajo y los efectos técnico-económicos involucrados.

Los cambios en la capa superficial diversifican la estructura molecular del material y en la microestructura y frecuentemente aparecen en áreas de estas mismas capas causando la diversificación de las propiedades en zonas particulares. No siempre todas las capas son utilizadas durante la explotación de la parte o de la pieza. Esto se conecta en alguna parte con el desgaste permisible, en otra parte, frecuentemente se remueve parte de la capa para obtener el dimensionamiento correcto.

#### **Objetivo del capítulo**

Establecer el estado actual del tratamiento de piezas mediante la deformación plástica por rodadura así como las herramientas utilizadas en estos procesos.

### **1.2. Endurecimiento en frío**

El endurecimiento de una aleación se pone de manifiesto tanto mecánica, como microestructuralmente. Desde el punto de vista mecánico ocurre un aumento en la resistencia del material durante la deformación irreversible, cuando la tensión aplicada supera su límite elástico, y tiene como consecuencia el aumento de la dureza. A nivel microestructural se manifiesta en un aumento de la densidad de las dislocaciones, activando las fuentes que generan dislocaciones del tipo Frank-Red y la formación de celdas de subgranos.

El trabajo en frío, según Moreno (2005), aumenta la cantidad de tensión necesaria para el deslizamiento, el hecho se puede relacionar con la teoría de la dislocación ya que la red cristalina deformada del material impide el movimiento de las dislocaciones y la dislocación bloqueada solamente puede desplazarse si se incrementa la tensión, de esta forma, una aleación endurecida por deformación se puede someter a tensiones mayores que el mismo material recocido antes de que ocurra la deformación, esto es fundamental en la consolidación de las aleaciones.



En el último caso, el efecto del trabajo en frío, superpuesto al efecto de endurecimiento de la fase sólida, Lebedko (1982); Kukielka (1989) y Dogan *et al.* (1997), da lugar a la obtención de una aleación más resistente que el que se podría producir por cualquier otro tratamiento.

Las magnitudes de las tensiones en la red cristalina se verán influenciados por los parámetros de las cargas aplicadas al material y la velocidad de aplicación de dichas cargas, entre otros factores, que someten el enrejado cristalino a esfuerzos de tracción y compresión, las cuales actuarán en el mismo sentido o en sentido contrario a las provocadas por los desplazamientos de los cristales, cuyos átomos constituyen barreras u obstáculos al movimiento de las dislocaciones (Callister, 1999; Pero-Sanz, 2000 y Key to steel, 2002). El afino del tamaño de grano es el único mecanismo que permite mejorar al mismo tiempo las propiedades de tenacidad y resistencia (Pickering y Gladman, 1963) y es por tanto un factor de vital importancia en la consecución de elevados grados de endurecimiento.

### **1.3. Tendencia del proceso de deformación plástica superficial por rodillo**

La deformación plástica superficial (DPS) constituye un método de tratamiento superficial de las piezas para incrementar sus cualidades físico – mecánicas aprovechando las características de plasticidad de los metales, lo cual puede evitar en muchos casos el empleo de esquemas tecnológicos tradicionales como el tratamiento térmico, que es altamente consumidor de energía y potencialmente contaminante del medio ambiente (Odintsov, 1987)

La tendencia del proceso de deformación plástica superficial por rodadura, aunque sus reportes son desde hace aproximadamente 35 años en Cuba, los trabajos de los que se tiene evidencia son reportados en la última década. Díaz (2006), implementa un procedimiento metodológico para la elaboración de piezas por bruñido con rodillo simple en acero AISI 1045, donde se emplearon indistintamente parámetros como fuerzas de 1 000; 1 500 y 2 000 N, número de pasadas de tres a cinco, avance de la herramienta de 0,066; 0,147 y 0,228 mm/rev y diámetro del rodillo de 41 mm, para evaluar la dureza, la rugosidad superficial y la profundidad de la capa endurecida.



Hernández (2005) realiza el proceso de deformación plástica en acero AISI 1045 con el empleo de un torno 16 D 20, utiliza parámetros como fuerza de 500; 1 500 y 2 500 N, avance de la herramienta de 0,075; 0,125 y 0,25 mm/rev, así como número de revoluciones del husillo de 27; 54 y 110 rev/min, en este trabajo se analiza la influencia de los parámetros sobre la dureza de la capa superficial.

Alcántara (2007) a partir de los parámetros establecidos por Hernández (2007) establece el comportamiento microestructural del acero AISI 1045 deformado por rodadura, caracteriza metalográficamente las muestras deformadas, las cuales fueron obtenidas variando los parámetros del proceso, además precisa que el endurecimiento del acero después de deformado ocurre por efecto de la acritud.

Jiménez (2007) realiza la simulación con el empleo del Método de los Elementos Finitos, establece parámetros sobre el comportamiento del proceso, emplea diámetro de 30 y 40 mm respectivamente, establece el mallado del elemento, así como las condiciones de frontera, apunta que la simulación es la presentación aproximada de la realidad en forma de un modelo numérico permite la resolución del problema, donde los coeficientes se calculan automáticamente por el ordenador a partir de la geometría y propiedades físicas de cada elemento. Sin embargo queda en manos del usuario decir hasta que punto la discretización utilizada en el modelo representa adecuadamente el modelo de la estructura.

Camejo (2008) realiza los cálculos de costos por lo que incurre la deformación, incluye en los mismos las operaciones por las que transita el proceso, así como máquinas, equipos y mano de obra, precisa en su trabajo que los costos principales en los sistemas productivos de bienes materiales son por lo regular la maquinaria y la materia prima. Los costos de planeación, la administración ventas y el cumplimiento de estándares son para lograr aumentar la eficiencia y no son muy altos en comparación con el costo final del producto terminado. En este conjunto de gastos se ubica a la planeación del producto o el análisis o diseño de los sistemas productivos.

Piñeiro (2008) realiza el diagrama  $\sigma - \epsilon$  en muestras deformadas por rodadura y luego traccionadas, se definió las regularidades del comportamiento mecánico y

funcional del acero AISI 1045 endurecido mediante la deformación plástica superficial con rodillo cuando es sometido a ensayos de tracción, se produce un aumento considerable de la tensión máxima de resistencia a la tracción incrementando las propiedades mecánicas del material al comparar el valor de esfuerzo máximo ( $\sigma_B = 674MPa$ ) de la probeta patrón, con los mínimos y máximos obtenidos del cálculo de las nueve probetas ensayadas, los cuales oscilan entre 814 MPa y 926 MPa.

Fernández *et al.* (2008a) muestra las técnicas empleadas en un diseño de experimento que permite evaluar el comportamiento de las variables independientes fuerza (P), desde 500 hasta 2500 N, número de revolución (n) mínimo 27, medio 54 y máximo 110 rev/min y avance (s), 0,075, 0, 125 y 0,25 mm/rev, para determinar el comportamiento de la variable dependiente dureza (H), cuando una probeta de acero AISI 1045 es sometida a tratamiento superficial por rodadura para crear un estado compresivo que lo deforme e incremente su resistencia al desgaste y la fatiga. Se realiza el procesamiento estadístico de las variables involucradas en el proceso donde se demuestra el incremento de la dureza desde 220 hasta 262 HV. Se empleó el método de microscopía óptica para analizar el efecto del endurecimiento por deformación, estableciendo el mecanismo de endurecimiento del acero por el deslizamiento de los granos en la red cristalina por el fenómeno de la acritud.

Fernández *et al.* (2008b), aborda el comportamiento microestructural del acero AISI 1045 endurecido mediante la deformación plástica superficial por rodillo, establece que el endurecimiento del acero AISI 1045 ocurre por el deslizamiento de los granos en la red cristalina y por efecto de la acritud, la cual es producto de la reducción de los granos cuando el material es sometido al tensionamiento de su estructura cristalina.

Fernández *et al.* (2008c) realiza el procedimiento tecnológico denominado deformación plástica superficial del acero AISI 1045, empleado en elementos como árboles y ejes de las diferentes máquinas y equipos que son sometidos a proceso de tratamiento térmico para elevar su dureza. El objetivo fundamental es



establecer el proceso de endurecimiento de piezas con empleo de rodillo, para sustituir las operaciones de temple-revenido como altos consumidores de electricidad. Se realiza el procesamiento estadístico de las variables involucradas, para demostrar la influencia del comportamiento de la dureza (H), en relación con las variables número de revolución (n), fuerza compresiva (P) y el avance (S). Se realiza el procesamiento estadístico de las variables y se demuestra gráficamente el comportamiento de la dureza con relación a la fuerza y al avance demostrando que existe un estado tensional que deforma el material en la medida que se incrementan los valores de las variables n, s, P.

Fernández *et al.* (2009) muestra la forma de sujeción de la pieza entre plato y punto, método empleado para evitar la flexión de la pieza durante el proceso de elaboración, se muestran las variables del diseño de experimento, número de revoluciones, avance y fuerza las cuales permiten realizar el procesamiento estadístico de los datos lo que luego son graficados para obtener el comportamiento de las curvas de fuerza contra dureza y avance contra dureza y demostrar el Incremento de la dureza superficial en la medida que se incrementa el valor de las variables. Se describen los pasos para la preparación metalográfica de la probeta desde el corte de la misma con el empleo de cuchilla del tipo SANVIDK hasta el pulido para la observación metalográfica donde se determina el comportamiento de la red cristalina por el tensionamiento de los granos y el endurecimiento por acritud

Fernández *et al.* (2010) en este trabajo se analiza el comportamiento microestructural del acero AISI 1045, endurecido mediante deformación plástica superficial por rodillo, empleando como variables en el proceso de endurecimiento el número de revoluciones, avance y fuerza del torno 16D20. Se empleó el análisis espectral para determinar la composición química del acero y el Nital como reactivo químico para resaltar la estructura metalográfica después de pulida. Se establecen los parámetros de los regímenes de la deformación plástica superficial por rodillo para evaluar la dureza de los pasadores utilizados en las esteras de los equipos de laboreo minero y se expone una metodología para determinar el tiempo de ejecución del corte de las muestras.



Ramos (2010) realiza el análisis estadístico a muestras deformadas y luego traccionadas. En el análisis se tienen en cuenta análisis estadísticos para evaluar el comportamiento de la curva tenso – deformacional del acero AISI 1045, los análisis efectuados fueron: el análisis de varianza, análisis de regresión y el análisis factorial. Las nueve probetas son graficadas teniendo en cuenta el software Excel y los datos son procesados con el empleo del software Statgraphics Plus V 5.1 Español. Para poder evaluar los cambios significativos del proceso se realiza un gráfico donde se puede observar el comportamiento del acero en estado normal de suministro y después de deformado con el empleo de rodillo.

Linares (2010) determina las tensiones superficiales en piezas tratadas por el proceso de deformación plástica en frío con el empleo de la difracción por rayos X, se determinaron la distancia interplanar tensionada y libre de tensiones, la altura media del pico, dominio cristalito, lo que luego fueron graficadas empleando el método  $\text{sen}^2 \psi$ .

Negret (2010) realiza la determinación del modelo estadístico – probabilístico para el establecimiento del proceso de deformación plástica superficial por rodillo simple, obtiene modelos lineales de mínimos cuadrados estadísticamente significativos que muestran una tendencia creciente de sus propiedades mecánicas y funcionales en la misma medida que se incrementan las variables independientes del proceso de experimentación (n, P), no así en el caso de S que no es significativo en el comportamiento de la dureza, las cuales están relacionadas con los valores de número de revolución, fuerza y avance.

Hernández (2010) determina el exponente de endurecimiento  $n$  en probetas deformadas por rodillos y traccionadas, a través de la ecuación de Hollomon expone el coeficiente de resistencia del material (K), la determinación del esfuerzo real, la determinación del esfuerzo ingenieril, análisis del esfuerzo real último junto al coeficiente de resistencia del material deformado, el análisis del esfuerzo ingenieril para el límite de fluencia, la deformación logarítmica  $\epsilon$  frente a las



fuerzas aplicadas, el coeficiente de endurecimiento respecto a la fuerza aplicada, el comportamiento de la deformación verdadera frente al esfuerzo verdadero.

Revé (2010) establece una metodología para determinar el estado tensional del acero AISI 1045 deformado en frío por el método de la cicloide, considera un diseño de experimento factorial completo que describe la metodología del estado de tensión en la zona de contacto, a fin de evaluar la influencia en probetas simétricas de parámetros como el diámetro del rodillo ( $d_p$ ), la profundidad de penetración ( $h_p$ ); y el ángulo de contacto ( $\theta_k$ ); en el trabajo, se utilizan el software Excell 2010 y el Mathcad para realizar los cálculos y graficar los resultados obtenidos por la metodología propuesta.

Raimón (2011) establece el comportamiento del acero AISI 1045 deformado por rodadura ante cargas cíclicas de torsión en nueve muestras deformadas por rodadura empleando las variables fuerza (N); número de revoluciones (n) y avance (s), cada uno de ellos evaluados en tres niveles se analiza la dureza del material al someterlo a ensayo de torque, en el ensayo se empleó una máquina CRITM NWS 500, con desplazamiento en el cabezal, la que a su vez tabula los resultados obtenidos.

Fernández (2011) elabora una ficha de costos para el proceso de deformación plástica en frío por rodadura, para determinar los componentes del procedimiento se tuvo en cuenta las operaciones por la que transita el mismo como son: corte , torneado exterior, deformación propiamente dicha de las probetas, corte de las muestras, pulido y observación microscópica, considerando además consumo energético, mano de obra directa e indirecta, costos indirectos de fabricación, a partir de los elementos de costos empleados en la Empresa "Comandante Gustavo Machin Hoed de Beche". Los resultados obtenidos permiten elaborar la ficha de costo del endurecimiento en frío en relación con el tratamiento térmico de alta frecuencia.

En los trabajos realizados por estos autores tienen en común el diseño de experimento expuesto por Fernández (2007), a pesar que Jiménez (2007); Fernández *et al.* (2009) y Linares (2010), tienen en cuenta el comportamiento de

las tensiones, en ninguno de estos trabajos se considera el comportamiento de las mismas en consideración con la variación del diámetro de la pieza antes y después del tratamiento, los radios del rodillo y la profundidad de la capa endurecida, para evaluar la dureza superficial del acero AISI 1045 deformado por rodadura.

#### 1.4. Tensiones residuales en materiales deformados

Las tensiones residuales son las tensiones existentes en un cuerpo sólido sin la aplicación de fuerzas externas (incluyendo la gravedad) o gradientes térmicos. Todo sistema de tensiones residuales está en equilibrio y la sumatoria de fuerzas resultantes y de momento producido es cero. El valor máximo en el módulo que las tensiones residuales pudieran llegar, es el propio límite de escurrimiento del material. La figura 1.1 muestra el comportamiento de las capas tensionadas cuando son sometidas a proceso de tracción o compresión.

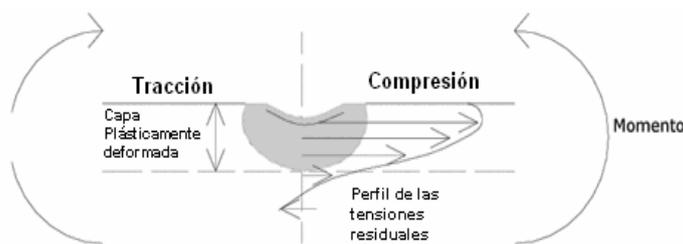


Figura 1.1. Diagrama del perfil de las tensiones residuales. Fuente: Lu (1996).

Las tensiones residuales son las tensiones presentes en un material cuando no está sometido a ninguna fuerza ni momento externo. En el caso de capas delgadas es muy habitual que se generen tensiones durante la deposición, normalmente debidas a las diferencias existentes entre las estructuras cristalinas de las diferentes capas. Estas tensiones pueden ser tractivas (positivas), pudiendo llegar a fracturar la capa, o compresivas (negativas), que disminuyen la adherencia de las capas al substrato.

Con el incremento del grado de deformación plástica, se eleva la energía interna del metal, se deforma su estructura cristalina y cambian sus propiedades: el metal se endurece, se reduce su estabilidad ante la corrosión, se incrementa la velocidad de difusión y de las transformaciones físicas, disminuye su densidad y



se acentúa la anisotropía de sus propiedades (debido a que se favorece la orientación de los cristales, de su textura).

Considera Masubuchi (1980) que durante el tratamiento térmico, la elaboración por corte y otros procesos tecnológicos en los artículos pueden surgir tensiones internas, que se equilibran mutuamente en el interior del cuerpo. En la mayoría de los casos estas tensiones parcial o totalmente se mantienen dentro del metal una vez culminado el proceso tecnológico, por eso se denominan tensiones residuales.

Los autores Dieter (1988) y Ossowska *et al.* (2002), coinciden en plantear que el surgimiento de las tensiones residuales está asociado a los cambios de muchas propiedades físico – químicas y físico – mecánicas de los materiales, condicionadas por las particularidades de cada proceso tecnológico de fabricación de las piezas, por esta razón dichos procesos deben ser diseñados de forma tal que las tensiones residuales que surjan en las capas superficiales garanticen la fiabilidad del trabajo de los artículos en condiciones de explotación.

### **1.5. Tensiones en los procesos de deformación plástica superficial**

No se puede dejar de abordar, en un trabajo que trate sobre la deformación plástica en frío, el tema de las tensiones y las deformaciones por la importancia que este tiene y porque ambas son parte del fundamento teórico del proceso de deformación que se analiza.

Es conocido que durante la operación de rodilado se genera un estado tensional volumétrico de compresión no uniforme, dado por la fuerza compresiva constante y por las reacciones de oposición del material ante la misma, en las otras dos direcciones.

Según Pero-Sanz (1992), en la teoría de la plasticidad se abordan los métodos de cálculo de tensiones y deformaciones en un cuerpo deformado. Es necesario, como lo es también para la teoría de la elasticidad, establecer ecuaciones de equilibrio y compatibilidad y determinar las relaciones experimentales entre la tensión y la deformación.



La relación general entre la tensión y la deformación debe contener:

1. Las relaciones elásticas de tensión – deformación.
2. La condición de tensión para la cual comienza el flujo plástico.
3. Las relaciones plásticas de tensión – deformación o el incremento de las mismas.

Martin (1999), plantea que desde que se formularon las bases teóricas de la plasticidad hasta el presente, los estudios ingenieriles han estado preponderantemente dirigidos hacia el análisis de la distribución de tensiones y deformaciones en los materiales bajo un tipo de deformación, y en la predicción del rango límite de esta deformación en relación con la resistencia intrínseca del material.

Mallo (1987) plantea que el análisis exhaustivo del desarrollo de los procesos por deformación plástica se está intentando realizar mediante el seguimiento en cada instante del continuo cambio en forma y posición de la superficie de fluencia. Un estudio aproximado de la transformación de la superficie de fluencia se puede realizar mediante los criterios del endurecimiento por deformación en frío.

Odintsov (1987) considera que los principales factores de fortalecimiento del proceso de deformación plástica superficial son la profundidad e intensidad de la deformación de la capa superficial y el sistema de tensiones resultantes. Teniendo en consideración estos indicadores de la calidad de la capa superficial, en el caso de usar rodillos para alcanzar la deformación plástica superficial, la mayor influencia la tienen la fuerza de deformación, la magnitud máxima de las tensiones normales y tangenciales que actúan en el punto de deformación, y también la relación de sus valores, que determinan la dirección de las deformaciones y desplazamientos del metal en la zona de contacto.

Dieter (1967) plantea que las tensiones residuales internas constituyen el sistema de tensiones que puede existir en un cuerpo cuando está libre de la acción de fuerzas externas y se producen cuando un cuerpo sufre una deformación plástica no uniforme, y el signo de la tensión residual producida por dicha deformación será opuesto al de la deformación plástica que la produjo.

Boyle y Spence (1989) afirman que al examinar la deformación plástica y el endurecimiento por deformación en frío se puede observar que a cada magnitud de tensión le corresponde una determinada deformación, cualquier material bajo la acción de una tensión constante, puede en determinadas condiciones deformarse progresivamente con el tiempo, este fenómeno recibe el nombre de fluencia.

Mazein *et al.* (2001), consideran que las tensiones residuales (figura 1.2) y las deformaciones que aparecen en el proceso de elaboración, determinan en alto grado la exactitud de las piezas y la calidad de su capa superficial para elevar la efectividad en los procesos tecnológicos de la deformación plástica superficial, hace falta tener un modelo del estado tensión deformación que se forma como resultado de la elaboración.

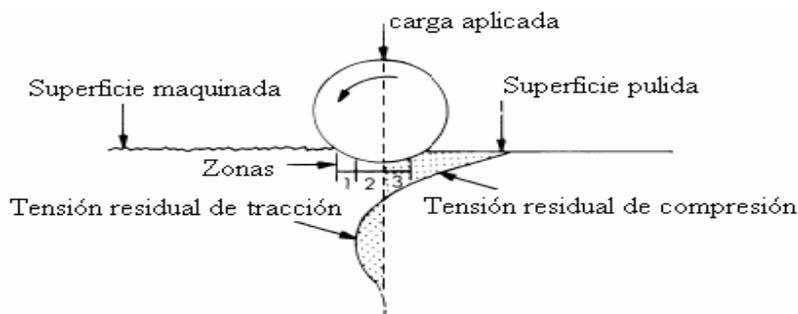


Figura 1.2. Tensiones residuales en el proceso de deformación.

Fuente: Mazein *et al.* (2001).

Plantean Kuznezov *et al.* (1986) y Smith (2001), que para el estudio de la relación entre las tensiones y las deformaciones existen otros modelos que permiten caracterizar el comportamiento del material bajo determinadas condiciones tecnológicas.

Las tensiones residuales en los metales son causadas por la deformación de partes de la estructura cristalina interna del propio material. Para restaurar esta redícula interna es necesaria la introducción de energía a la pieza.

### **1.6. Estado de tensión en la zona de contacto con la superficie deformada**

La calidad de la capa superficial en el caso de usar la deformación plástica superficial por rodillos, la mayor influencia la tienen la fuerza de deformación, la magnitud máxima de las tensiones normales y tangenciales que actúan en el

punto de deformación, y también la relación de sus valores, los elementos anteriores determinan la dirección de las deformaciones y desplazamientos del metal en la zona de contacto (Chen, 2001).

La forma real de contacto entre el rodillo y la pieza y el carácter de fluidez plástica del metal permiten determinar el estado de tensión y tener en cuenta la dinámica del proceso de deformación. El cuerpo rígido no lineal puede ser descrito con la ley de Hooke, donde el módulo de rigidez no es constante y depende de la deformación (Dorofev, 1986; Nikiforov *et al.*, 2001).

En la Figura 1.3, se puede apreciar un esquema del comportamiento de la distribución de las tensiones residuales compresivas y observar cómo los valores más altos se encuentran en las capas subsuperficiales, zona muy cercana a la superficie. Además, se muestran las diferentes zonas de trabajo de este proceso.

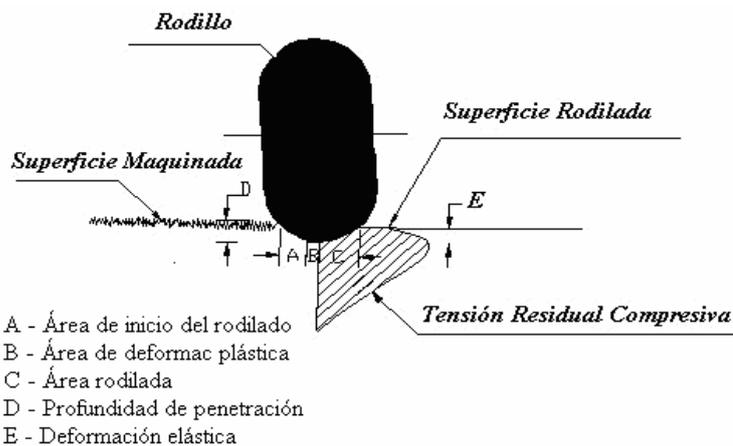


Figura 1.3. Acción del rodillo sobre la superficie y la distribución de la tensión residual compresiva.

Fuente: Sugimoto (2005).

### 1.6. Deformación de la red cristalina (tensiones residuales de tercer género)

EL endurecimiento por deformación del metal, debido a su propia deformación plástica, en gran medida depende del estado tensional en que se encuentre en las zonas sub - microscópicas (en los volúmenes de las redes cristalinas) y microscópicas.

Davidienkov (1946) en sus estudios sobre el proceso de las tensiones plantea que al realizarse la deformación plástica se gasta energía, del 75 al 90 % de la cual se



convierte irreversiblemente en calor, mientras que del 10 al 15 % (y cuando la aplicación de la fuerza es dinámica: hasta el 25 %) se absorbe por la red cristalina. La energía absorbida por el metal lo saca de su estado estable (sin endurecimiento) y lo conduce a un estado inestable (al endurecimiento). En este caso, toda la energía acumulada en el metal (el 99,9 %), se conserva en el mismo, en forma de deformaciones de la red cristalina, que tiene las mismas escalas que las dimensiones atómicas y se denominan tensiones de tercer género. Las tensiones de tercer género revelan su acción a escala de  $10^{-6}$  a  $10^{-7}$  mm, es decir en dominios formados sólo por varios núcleos cristalinos elementales.

Cullity (1977); Prevey (2000); Sakai y Tamura (2000) afirman que las tensiones de las redes cristalinas se forman alrededor de las dislocaciones y en las dislocaciones rectilíneas van disminuyendo proporcionalmente a la distancia desde la línea de la dislocación. A la distancia de 1 m de ella la tensión es aproximadamente igual al límite de fluencia del metal en estado de recocido. Los átomos intersticiales constituyen otra fuente de tensiones de tercer género, que abarca una zona de menor orden que la de las dislocaciones. En dependencia de sus dimensiones, resultan posible tanto la tracción, como las compresiones de la red, que crean campos de fuerza, que a su vez se difunden en todas direcciones a aproximadamente la misma distancia.

Weertman (1992); Askeland (1994) consideran que todos los metales son cristalinos. Las estructuras cristalinas que adoptan, así como las imperfecciones en el arreglo, determinan en buena medida muchas de sus propiedades más relevantes. En particular, los defectos llamados dislocaciones son responsables de la ductilidad de los metales. En una aleación los elementos aleantes pueden existir como átomos aislados alojados en la red cristalina como intersticiales o sustitucionales, también pueden formar compuestos. El conocimiento de la estructura cristalina de los metales permite comprender mejor sus propiedades y su desempeño en aplicaciones prácticas.

## **1.7. Método estadístico en los diseños de experimentos**

Diseñar un experimento significa planear un experimento de modo que reúna la información pertinente al problema bajo investigación. El diseño de un experimento es la secuencia completa de pasos tomados de antemano para asegurar que los datos apropiados se obtendrán de modo que permitan un análisis objetivo que conduzca a deducciones válidas con respecto al problema establecido.

Box y Hunter (1978); Gutiérrez y De la Vara (2003) afirman que las técnicas estadísticas del diseño experimental tienen su razón de ser en la investigación empírica que trata de indagar cómo ciertas variables, conocidas como factores, actúan sobre una variable respuesta registrada tras la realización del experimento. Es importante hacer destacar que los factores que influyen sobre el valor de la variable respuesta sólo pueden tomar un número finito de estados o niveles.

Los tests básicos en estos modelos se centran en contrastar si los factores realmente alteran los resultados de los experimentos al fijarlos en sus diferentes niveles. La técnica, que consiste en descomponer la variabilidad total en las variabilidades aportadas por los diferentes factores y sus interacciones mutuas, recibe el nombre de análisis de la varianza.

### **1.7.1. Análisis de varianza**

Ostle (1975) y Sarache (2004) plantean que en la práctica nos enfrentamos a muchos fenómenos donde se necesita comparar más de dos poblaciones, es decir, donde es necesario comparar simultáneamente más de dos valores medios. El análisis de varianza (ANOVA) nos permite realizar dicha comparación.

El ANOVA fue introducido en la tercera década del siglo XX por el estadístico inglés Ronald A. Fisher y en sus inicios estuvo vinculada a las investigaciones agrícolas, pero con el transcurso del tiempo su utilización se ha extendido a todas las ramas de las ciencias.

El ANOVA como técnica estadística, permite el estudio de las características medidas u observadas, cuyos valores dependen de varias clases de efectos que operan simultáneamente y mediante este análisis poder decidir si tales efectos son

o no diferentes, es decir, esta técnica se basa en la división de la variabilidad total de una característica medible en la variabilidad causada por diferentes factores que intervienen en el problema.

El análisis de las características observadas está basado en la modelación matemática de ellas mediante el modelo lineal. En el ANOVA la repetición de la observación se debe entender como la repetición del experimento, entendiéndose por repetición (réplica) la realización repetida del hecho que se estudia bajo las condiciones que los caracterizan, no es recomendable la utilización de esta técnica para una sola observación (Ferré, 2002).

El conjunto particular de condiciones experimentales cuyos efectos van a ser medidos y comparados en el desarrollo del experimento diseñado se conoce como Nivel o Tratamiento.

### **1.7.2. Análisis de regresión**

El análisis de correlación desarrolla métodos que nos sirven para " investigar si dos o más variables están relacionadas " y para medir " la intensidad de esta relación ".

El análisis de regresión, por su parte, nos ayudará a " determinar el modelo o ecuación matemática que mejor representa la relación existente entre las variables analizadas ".

En los modelos de regresión la variable dependiente  $Y$  es siempre una variable aleatoria, mientras que los factores o variables independientes son considerados como variables no aleatorias. Esto se argumenta en el hecho de que en las aplicaciones prácticas los valores de las  $X_i$  suelen ser controladas o elegidas de antemano por el investigador, estos factores también se les denomina variables explicativas, ya que ellos en definitiva son los que explican el comportamiento de la variable dependiente (Box y Hunter, 1989).

### **1.7.3. Métodos experimentales para estudiar la deformación plástica**

Para estudiar el comportamiento de las cualidades superficiales de las piezas tratadas en la deformación plástica superficial por rodillo son muy útiles las técnicas de diseño de experimentos, permiten darle solución y explicación científica efectiva y económica a los problemas objeto de análisis.



Hernández (1997) plantea que la utilización del diseño de un modelo experimental se fundamenta, entre otros aspectos, en cuatro reglas básicas:

- Disminuir el número de corridas experimentales necesarias
- Cambiar el valor de los factores de acuerdo con reglas
- Utilizar en el procesamiento métodos matemáticos normalizados
- Poseer una estrategia de trabajo por etapas

De la bibliografía consultada se pudo establecer que para el estudio del efecto de este tratamiento en las cualidades superficiales de las piezas han sido empleados diseños experimentales del tipo factorial completo (Loh, 1989; Lee, 1992 y El - Axir, 2003) también se ha usado el diseño factorial parcial, Box y Hunter (El - Axir, 2000 y El - Khabeery, 2001) y en otros casos se ha utilizado el Método de Taguchi (Lee, 1992 y Pacana, 2002) empleando indistintamente como variables de entrada la fuerza (o la profundidad de penetración), el avance, el número de pasadas (o el tiempo), la velocidad, la dureza y la rugosidad superficial previas, analizando como respuestas la dureza y la rugosidad superficial final, la falta de cilindridad y la reducción del diámetro.

### **1.8. Método de los Elementos Finitos**

El término simulación infiere el estudio de un sistema mediante un modelo. La simulación, es el estudio de un sistema, o parte de dicho sistema, mediante el trabajo del modelo matemático o del modelo físico. La utilización del diseño de un modelo experimental se fundamenta entre otros aspectos, en cuatro reglas básicas según Hernández (1997).

- Disminuir el número de corridas experimentales necesarias.
- Cambiar el valor de los factores de acuerdo con reglas.
- Utilizar en el procesamiento métodos matemáticos normalizados.
- Poseer una estrategia de trabajo por etapas.

En la actualidad, el método de la simulación ha sido muy generalizado y constituye una potente herramienta de cálculo numérico capaz de resolver cualquier problema formulable de la matemática, la física y la mecánica; permitiendo simular



y realizar una gran cantidad de análisis en componentes y estructuras complejas, difícilmente calculables por los métodos analíticos tradicionales.

Con la simulación se puede obtener la resolución numérica de las ecuaciones matemáticas que describen el fenómeno estudiado con el uso de un ordenador. Por lo tanto, se puede asumir que la simulación es tan exacta como tantas sean las ecuaciones de partida y la capacidad de los ordenadores para resolverlas, lo cual fija límites a su utilización Ingham y Moreland (1983).

Plantea Alfaro (2001), que un programa de simulación es una pieza compleja de software en la que confluyen numerosas operaciones. Por este motivo suelen estar divididos en subsecciones, cada una de las cuales efectúan una operación determinada. Sin embargo, el tema no se limita al puro cálculo. La preparación de los datos y el análisis de los resultados numéricos que aparecen como producto del cálculo, son elementos que están integrados al software. Así pues, un paquete de cálculo de simulación consta de un procesador, en el cual se incluyen todas las ayudas a la preparación de los datos y que generan los archivos de resultados, y un postprocesados que facilita el análisis e interpretación de los resultados, generalmente en forma de gráfica mediante trazado de curvas, gráficos tridimensionales, tablas.

El método de los elementos finitos tiene su origen en los años cincuenta, cuando ingenieros adaptan el análisis variacional aplicado a los medios continuos a las estructuras discretizadas con elementos. Sin embargo, pronto se dieron cuenta de la potencialidad de este método en aplicaciones muy variadas: análisis térmico, estudio de dinámica de fluidos, campos electromagnéticos (Bathe, 1996 y Thomée, 1997).

En su trabajo Huang y Usmani (1994), describen un método de los elementos finitos componiendo una compilación de tres procesos: la formula variacional de Rayleigh-Ritz, el recubrimiento del entorno de integración con intervalos compactos e interconectados por los nodos y la aplicación del algoritmo de residuos ponderados



En el caso específico del análisis tenso - deformacional de elementos sometidos a la acción de cargas dinámicas, el método permite la determinación de los componentes y la determinación del estado deformacional en ciertos puntos característicos. Este tipo de análisis permite acotar la deformación del objeto de estudio y localizar zonas altamente solicitadas o zonas de baja sollicitación.

### **1.8.1. Discretización espacial**

Por discretización espacial se entiende la reticulación del espacio de integración  $W$  en elementos. La dimensión de la malla contribuye a la exactitud con la que se obtiene la solución, es decir, cuanto más pequeño sea el tamaño de los elementos, mayor será la precisión del resultado numérico. El precio que hay que pagar al aumentar el número de elementos, y consecuentemente el de nodos, es un mayor consumo de memoria y de tiempo de procesamiento (Huang, 1994) (Lewis, 1996) (Saavedra, 2000).

Se pudo determinar, de la revisión bibliográfica, que numerosos trabajos investigativos Skalkis (1995); Hasegawa (1998) y Mazein (2001) se están desarrollando para tratar de modelar matemáticamente y simular a través de los métodos numéricos el comportamiento de los materiales en los procesos de deformación plástica superficial. El método de los elementos finitos (MEF) es uno de los más empleados para el estudio de este fenómeno. Es común que en estos métodos se defina un criterio de plasticidad y un modelo de comportamiento del material.

El empleo de estos métodos se realiza para:

- 1- La óptima selección de los parámetros de trabajo y de las respuestas
- 2- La predicción teórica del comportamiento del material durante el proceso
- 3- Controlar los procesos de deformación plástica superficial

En su trabajo Courtin *et al.* (2003) considera que desde el punto de vista matemático, un modelo plástico queda perfectamente definido por varios elementos básicos como son:

1. Criterio de plasticidad.
2. Ley de fluencia.



### 3. Ley de endurecimiento

Existe una superficie denominada superficie de fluencia que está muy vinculada con esos elementos básicos. Esta superficie no es más que el contorno que delimita el dominio elástico. A la ecuación que lo define analíticamente se le denomina criterio de plasticidad. La superficie de fluencia se transforma durante los procesos de deformación plástica, debido a las deformaciones permanentes que va sufriendo el material y que modifican su estructura.

Como ya se ha señalado la superficie de fluencia evoluciona, cambia de forma y tamaño. Para establecer una teoría matemática de la plasticidad es necesario precisar cómo cambia esta superficie de fluencia, es decir, definir una función de carga completa.

#### **1.9. Conclusiones del capítulo 1**

- ✓ En las referencias consultadas se muestran comportamiento de las tensiones residuales después del proceso de deformación plástica en el acero AISI 1045, sin embargo en ninguna de ella se analizan las mismas considerando la variación del diámetro de la pieza, los radios del rodillo, la profundidad de la capa endurecida.
- ✓ Para el diseño de un experimento debemos tener en cuenta los efectos y las características del problema a resolver, para que el diseño sea lo más sencillo posible y así poder ahorrar tiempo, inversión y personal, pero no por eso se deben de olvidar considerar los principios básicos en el diseño.
- ✓ El Método de los Elementos Finitos es una herramienta con la cual se pueden determinar el comportamiento de las tensiones residuales del acero AISI 1045 deformado plásticamente.

# **Capítulo 2**

## **Materiales y métodos**

## **CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1. Introducción**

El comportamiento de la función de una pieza maquinada tal como la resistencia a la fatiga, capacidad de carga del rodamiento, fricción, dependen de una larga extensión en la superficie como la topografía, dureza, naturaleza de tensión y deformación inducida en la región de la superficie. Hoy en día, alrededor del 50 % de la energía aplicada es pérdida en la fricción de elementos en movimiento relativo. Los valores de rugosidad menores que  $0,1 \mu\text{m}$  se requieren para una buena apariencia estética, fácil moldeo, buena resistencia a la corrosión y alta resistencia a la fatiga.

Durante los últimos años, sin embargo, considerable atención ha sido prestada a las operaciones del post-maquinado de acabado del metal como el rodilado, el cual mejora las características de la superficie por deformación plástica de las capas superficiales. El mismo es esencial en el proceso de deformación en frío, en el cual el metal cerca de la superficie maquinada es desplazado desde las protuberancias hasta llenar las depresiones.

Además de producir un buen acabado superficial, el proceso tiene ventajas adicionales sobre otros procesos de maquinado, tales como el aumento de la dureza, resistencia a la corrosión y la vida a la fatiga como resultado de la tensión residual compresiva producida.

#### **En este capítulo se plantea como objetivo**

1. Fundamentar las propiedades a investigar y explicar los métodos, procedimientos y condiciones en la que se realizarán los experimentos.

### **2.2. Características de la herramienta para la deformación plástica por rodillo**

El perfil del elemento deformante (rodillo) es fabricado de acero rápido (HSS), aceros aleados con cromo, de aleaciones duras o de carburo cementado (metal duro) pulido (Odintov, 1987; Cogsdill Tools, 2003; Elliot Tools, 2004; Bright Burnishing, 2003). Debe poseer una alta dureza, entre 58 y 65 HRC y una alta resistencia al desgaste. La forma del perfil de trabajo del rodillo influye



marcadamente en los resultados obtenidos en el proceso de elaboración de la superficie (Odintov, 1987; Bencere Products, 2005).

El rodillo tiene 50 mm de diámetro, es de acero AISI 5140 con una dureza de 65 HRC, un acabado Ra de 0,5  $\mu\text{m}$  y un radio en el perfil de dos mm, posee salida libre para la herramienta. La justificación de empleo del tipo de rodillo radica en que para el endurecimiento de piezas de tal espécimen, es necesario utilizar rodillos con un radio de perfil pequeño (Murthy y Kotiveerachari, 1981), lo que permite obtener el mayor aumento de la dureza con esfuerzos relativamente pequeños.

El cuerpo es una barra de sección rectangular en forma de cuchilla que permite instalarla en el portaherramientas de la máquina. Una vez instalada la herramienta, se ajusta el calibrador roscado donde va acoplado un indicador de carátula, con una precisión de 0,005  $\mu\text{m}$ , que mediante el mismo, permite determinar con exactitud la fuerza que se transmite a la pieza y esta a su vez al rodillo, que es ejercida sobre la pieza y absorbida por la ranura.

La herramienta empleada se clasifica como herramienta de rodillo simple. Se selecciona por que sus características geométricas y constructivas ofrecen los valores de fuerza que se necesitan en el experimento, por lo fácil que resulta su adaptación al diseño de la herramienta y por lo sencilla que resulta su calibración. El diseño de herramienta se adapta muy bien a las condiciones tecnológicas de los talleres del país que se caracterizan por producciones que pueden llegar a ser hasta seriadas, además de facilitar el tratamiento del diámetro exterior de piezas simétricas de revolución, ampliamente fabricadas en los talleres mecánicos.

Cuando se aplica la fuerza sobre la pieza inevitablemente existirá cierta deflexión del eje de rotación y por tanto una alteración de la forma de la pieza. Para comprobar que dicha deflexión se encuentre dentro de los valores admisibles, se calculó por la ecuación 2.1 de la línea elástica de la mecánica de materiales el valor de la deflexión provocada por la fuerza máxima del rodillo (2 500 N) para el montaje del conjunto entre plato y punto.

$$y_{\max} = \frac{7Pl^3}{768EI_x} \quad (2.1)$$

Donde:

- $y_{\max}$  - Deflexión de la línea elástica; mm,  
P - Fuerza máxima compresiva = 2 500 N,  
l - Distancia entre apoyos del mandril = 70 mm,  
E - Módulo de elasticidad del acero =  $2,1 \times 10^5$  MPa,  
 $I_x$  - Momento de inercia a la flexión =  $0,05 \text{ deq}^4 = 0,05 (15,31)^4 = 2 747 \text{ mm}^4$ .

$$y_{\max} = \frac{7 \cdot 2500 \cdot (70)^3}{768 \cdot 2,1 \times 10^5 \cdot 2747} = 0,013 \text{ mm}$$

Y se comprobó, según las recomendaciones de (Murthy y Kotiveerachari, 1981; El Axir, 2000) que:

$$[y] = 0,0002 \cdot l \quad [y] = 0,0002 \cdot 70 = 0,014 \text{ mm}$$

$$y_{\max} < [y]$$

El valor del diámetro de la probeta obedece al cumplimiento de la relación entre dicho diámetro y el diámetro del rodillo (Odintov, 1987 y Díaz, 2006) que debe ser:

$$0,5 < \frac{D_p}{D_{rod}} < 2,5 \quad (2.2)$$

Donde:

- $D_p$  - Diámetro de la probeta; mm,  
 $D_{rod}$  - Diámetro del rodillo; mm.

$$\frac{D_p}{D_{rod}} = \frac{30}{50} = 0,6$$

El resultado se corresponde con el método propuesto por Kosilov y Meshepiakov (1985).

### 2.2.1. Control del diámetro de la pieza

Es prácticamente imposible fabricar productos de ingeniería con una geometría perfecta en concordancia con las dimensiones de la pieza. El error de redondez

es considerado como uno de los más importantes errores geométricos para componentes cilíndricos porque tiene efectos negativos en la exactitud y otros factores importantes como los accesorios de los elementos de la máquina y el desgaste de los elementos en rotación.

La circularidad es obtenida como la diferencia entre el radio máximo y mínimo del perfil medido. La variación de la redondez o circularidad fue medida utilizando un pie de rey marca Mitutoyo de 0,05  $\mu\text{m}$  para la cual se midió el diámetro antes y después de efectuado el proceso.

## 2.2. Análisis microestructural

Se empleó un microscopio óptico binocular marca NOVEL modelo NIM – 100, ubicado en el Laboratorio de Ciencia de los Materiales del ISMM de Moa, que está dotado de una cámara instalada, el hardware IMI.VIDEOCAPTURE.exe (2006), que refleja la micrografía en el computador. Para observar las probetas, se nivelaron en un dispositivo con plastilina (ASTM E 3 – 95; NC 10 – 55: 86 y NC 04 – 77: 86). La muestra de la figura 2.1, con dureza de HB 170 y un tamaño de grano 5 (ASTM E 112), se corresponde con la estructura metalográfica del centro de la muestra patrón del acero AISI 1045 deformado plásticamente.

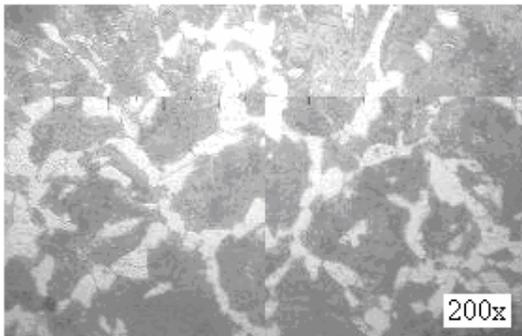


Figura 2.1. Estructura metalográfica ferrita - perlítica del acero AISI 1045 (200x).

Fuente: Fernández (2011).

## 2.3. Diseño de experimentos

En los trabajos analizados sobre el proceso de deformación plástica superficial donde se emplea rodillo simple, comúnmente se emplea el diseño de experimento propuesto por Fernández (2007). Para la realización de nuestro trabajo se considera el mismo diseño y aparece en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Parámetros de entrada del experimento

Parámetros	Símbolos	Niveles		
		Mínimo	Medio	Máximo
Fuerza (N)	P	500	1 500	2 500
Número de revoluciones (rev/min)	R	27	54	110
Avance (mm/rev)	S	0,075	0,125	0,25
Dureza (HV)	H	HV	HV	HV
Diámetro del rodillo	50 mm			

Para comprobar la idoneidad del método y los modelos propuestos se desarrolló el tratamiento estadístico de los resultados, tanto los simulados como los experimentales, se realizaron con la utilización del tabulador Microsoft Excel 2003 y el paquete estadístico STATGRAPHICS Plus 5.1, lo que permitió establecer la necesaria correspondencia entre las observaciones teóricas y las experimentales.

#### 2.4. Metodología para la deformación plástica superficial por rodillo

La magnitud del endurecimiento por deformación en frío y el nivel de las tensiones remanentes en la capa superficial dependen de la fuerza (P), del número de revoluciones ( $n_r$ ), del avance de la herramienta (S), de la geometría de la herramienta, de la pieza y las propiedades iniciales de la aleación en tratamiento (HB).

En las diferentes literaturas consultadas Boada y Sviagolski (1983); Korotcishe (1989); Murthy y Kotiveerachari (1981); Belozarov *et al.* (1993) y El Axir (2003), han tratado indistintamente de explicar las regularidades del comportamiento de la deformación plástica, en ninguna de ellas se establece una secuencia metodológica de cálculo que permita establecer el endurecimiento por rodillo del acero AISI 1045.

Boada *et al.* (2003) considera en su trabajo el acero AISI 1045, se determinan las tensiones de contacto para establecer el estado de las propiedades físico – mecánicas de superficies tratadas por deformación plástica superficial por el método de elementos finitos.

La tensión de proporcionalidad que actúa sobre toda la zona de contacto de forma distribuida y uniformemente a lo largo del sector, durante el trabajo con rodillo se determina por la ecuación 2.3 (Korotcishe, 1989):

$$\sigma_{pr} = a^3 \cdot \sqrt{\frac{P_p \cdot E}{R_2^2}} \quad (2.3)$$

$$a = \frac{1}{R_2 \cdot \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} \right)} \quad (2.4)$$

Donde:

$a$  - coeficiente que tiene en cuenta el radio del rodillo y de la pieza

$E$  - módulo de elasticidad de la pieza;  $MPa$

$P_p$  - fuerza ejercida por el rodillo sobre el material;  $N$

$R_2$  - radio de la superficie de endurecimiento de la pieza;  $mm$

$R_1$  y  $R_3$  - radios de la sección de trabajo del rodillo,  $mm$

La forma del perfil de trabajo del rodillo influye marcadamente en los resultados obtenidos en el proceso de elaboración de la superficie. Entre los más utilizados se pueden encontrar; rodillos con la banda cilíndrica y el radio abierto para la elaboración de superficies con la salida libre de la herramienta, rodillos con el radio cerrado para los empalmes redondeados y ranuras, rodillos con superficies combinadas para zonas cilíndricas con radio de transición, para las superficies con tope, para superficies cónicas.

La ubicación de los radios de la pieza y el rodillo a considerar en el proceso de deformación en frío, empleando rodillo, se muestran en la figura 2.2.

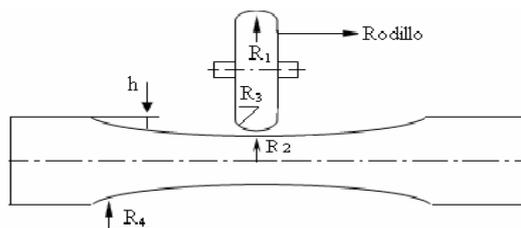


Figura. 2.2. Radios de curvatura del rodillo y de la pieza.

Fuente: Fernández *et al.* (2010).

Para evitar el resbalamiento del rodillo, provocado por la fuerza, es conveniente situarlo hacia el eje de la pieza en tratamiento, en dependencia del esfuerzo, de la

resistencia del material. La profundidad del endurecimiento, según Korotcishe (1989) se determina como:

$$h = \sqrt{\frac{P_p}{2 \cdot \sigma_T}} \quad (2.5)$$

Donde  $h$  es la profundidad de la capa endurecida en mm y  $\sigma_T$  es la tensión de fluencia del material a la tracción, en MPa.

Con el aumento del coeficiente de fricción externa y de la superficie de contacto del rodillo con la superficie de tratamiento, aumentan las irregularidades de la deformación plástica y como consecuencia el nivel de las tensiones. Las mismas surgen durante la compresión mutua de dos cuerpos en contacto bajo la acción de una fuerza externa estando el material en un estado tensional volumétrico al no poderse deformar libremente en esta zona.

El área real de tensiones máximas para la superficie de cuerpos curvos cuando se encuentran en contacto, se determina a partir de la fórmula de Hertz, siempre que el estado tensional sea volumétrico. Para determinar la magnitud del área de la deformación con rodillos, según Boada *et al.* (2003) es:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = 0,245 \cdot n_p \cdot \sqrt[3]{Fn \cdot E^2 \cdot \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right)^2} \quad (2.6)$$

Donde:

$\sigma_{m\acute{a}x}$  - tensiones máximas en el área de contacto; MPa

$F_n$  - fuerza sobre la zona de contacto; N

$R_{1,2,3,4}$  - radios de curvatura del rodillo ( $R_1$  y  $R_3$ ) y la pieza ( $R_2$  y  $R_4$ ); mm

$n_p$  - coeficiente que depende de los radios de la pieza y el rodillo:

$$n_p = \frac{R_1 \cdot R_2}{2 \cdot R_2 + R_1} \quad (2.7)$$

Para una relación tensión – deformación durante el proceso de deformación plástica, el material sometido al proceso, logra el apilamiento de sus granos por el

aplastamiento de los mismos, lo que permite incrementar su dureza. Las tensiones de aplastamiento se consideran uniformemente distribuidas sobre todo el área y según Murthy Kotiveerachari (1981), se determina como:

$$\sigma_{\text{máx aplast}} = \alpha \cdot \sqrt[3]{P \cdot E^2 \left( \frac{d_1 + d_2}{d_1 \cdot d_2} \right)^2} \quad (2.8)$$

Donde  $\sigma_{\text{máx aplast}}$ , es la tensión máxima de aplastamiento, en MPa y  $\alpha$  es un coeficiente que depende de la relación  $\frac{A_1}{B}$ ;  $A_1$  es el radio de la superficie de endurecimiento de la pieza; en mm y  $B$  considera el radio de la sección de trabajo del rodillo y de la pieza en mm;  $d_1$  es el diámetro del rodillo en mm y  $d_2$  el diámetro de la superficie endurecida en mm.

## 2.5. Métodos de los elementos finitos

A nivel conceptual, el método de los elementos finitos (MEF) consiste en la descomposición de un elemento físico continuo (estructura) en un número discreto de partes o elementos que se hallan conectados entre sí por un número discreto de puntos denominados nodos. Los movimientos de estos nodos constituyen las incógnitas fundamentales del problema. Dentro de cada elemento, los movimientos de cualquier punto se obtienen a partir de los movimientos de los nodos del elemento.

A continuación se describe de manera breve la formulación del método de los elementos finitos (Zienkiewicz, 1980 y Oñate, 1992).

Campo de desplazamientos. Se definen los desplazamientos de un punto cualquiera del elemento en función de los desplazamientos de los nodos del mismo, de manera única, a través de un conjunto de funciones polinómicas, llamadas "funciones de forma".

$$\underline{U}^e = \underline{N}^e \underline{a}^e \quad (2.9)$$

Donde  $u^e$  son los desplazamientos en cualquier punto del elemento e,  $a^e$  los desplazamientos nodales del elemento y  $N^e$  las funciones de forma.

Campo de deformaciones. Las funciones de forma definirán de manera única el estado de deformación dentro del elemento en función de los desplazamientos nodales.

Una vez conocidos los desplazamientos para todos los puntos del elemento, pueden determinarse las deformaciones en cualquier punto. Estas darán siempre por resultado una relación que podrá escribirse en forma matricial, como:

$$\underline{\varepsilon}^e = \underline{L}^e \underline{u}^e \Rightarrow \underline{\varepsilon}^e = \underline{L}^e \underline{N}^e \underline{a}^e \Rightarrow \underline{\varepsilon}^e = \underline{B}^e \underline{a}^e \quad (2.10)$$

Donde L es un operador diferencial lineal.

Campo de tensiones. Conocidas las deformaciones, a partir de las ecuaciones constitutivas, pueden determinarse las tensiones. Para un material elástico lineal, la relación entre tensiones y deformaciones viene dada por la matriz  $D^e$  que es la matriz constitutiva del material.

$$\underline{\sigma}^e = \underline{D}^e \underline{\varepsilon}^e \quad (2.11)$$

Utilizando (2.8) se tiene que:

$$\underline{\sigma}^e = \underline{D}^e \underline{B}^e \underline{a}^e \quad (2.12)$$

Se determina un sistema de fuerzas concentradas en los nodos, tal que equilibre las tensiones y las cargas repartidas que actúan en el elemento. El procedimiento más usual para establecer dicho equilibrio y relacionar las fuerzas actuantes en los nudos con los desplazamientos en dichos nudos se basa en la aplicación del "Principio de los Trabajos Virtuales (PTV)". Dicho principio establece que una estructura está en equilibrio bajo la acción de un sistema de fuerzas exteriores si al imponer a la misma unos desplazamientos arbitrarios (virtuales) compatibles con las condiciones en los apoyos, el trabajo realizado por las fuerzas exteriores sobre los desplazamientos virtuales es igual al trabajo que realizan las tensiones sobre las deformaciones producidas por los desplazamientos virtuales. Y puede escribirse como:

$$\iiint_V \delta \underline{\varepsilon}^T \underline{\sigma} \, dv = \iiint_V \delta \underline{u}^T \underline{b} \, dv + \oint_S \delta \underline{u}^T \underline{t} \, ds + \delta \underline{a}^T \underline{q} \quad (2.13)$$



Siendo  $\underline{q}$ ,  $\underline{b}$  y  $\underline{t}$  los vectores de fuerzas nodales, fuerzas por unidad de volumen y fuerzas por unidad de superficie respectivamente.

En esta expresión  $\underline{\delta u}^T = \underline{\delta a}^T \underline{N}^T$  y  $\underline{\delta \varepsilon}^T = \underline{\delta a}^T \underline{B}^T$ , con lo que, simplificando  $\underline{\delta a}^T$  puede reescribirse el PTV en el elemento como:

$$\iiint_V \underline{B}^T \underline{D} \underline{B} \underline{a} \, dv = \iiint_V \underline{N}^T \underline{b} \, dv + \oint_S \underline{N}^T \underline{t} \, ds + \underline{q} \quad (2.14)$$

Finalmente se obtiene la ecuación de equilibrio del elemento

$$\underline{q}^T = \underline{K}^e \underline{a}^e - \underline{f}^e \quad (2.15)$$

Donde  $\underline{K}^e$  es la matriz de rigidez del elemento

$$\underline{K}^e = \iiint_V \underline{B}^T \underline{D} \underline{B} \, dv \quad (2.16)$$

Y  $\underline{f}^e$  es el vector de fuerzas de volumen y superficie

$$\underline{f}^e = \iiint_V \underline{N}^T \underline{b} \, dv + \oint_S \underline{N}^T \underline{t} \, ds \quad (2.17)$$

Conocido el movimiento de un punto dentro de un elemento, estableciendo las condiciones de equilibrio y compatibilidad y dadas las relaciones constitutivas de los materiales, pueden obtenerse las deformaciones, tensiones y esfuerzos en cualquier punto del elemento.



## **2.6. Conclusiones del capítulo 2**

- ✓ La variación en el diámetro de la pieza permite establecer la variación del proceso de deformación del acero AISI 1045 después de ser sometido a compresión dinámica.
- ✓ Se consideró la microestructura del acero AISI 1045 para determinar el comportamiento de las tensiones luego de realizar el proceso por el Método de los Elementos Finitos.
- ✓ La metodología de cálculo empleada en el proceso de deformación permite establecer el comportamiento de las tensiones superficiales en relación con la variación del diámetro de la pieza, los radios del rodillo y la profundidad de la capa endurecida sobre el endurecimiento superficial del acero AISI 1045 deformado por rodillo.

# **Capítulo 3**

## **Análisis de los resultados**

## CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

### 3.1. Introducción

En éste capítulo se exponen los resultados derivados del trabajo experimental y a partir de los mismos, las expresiones matemáticas estadísticas que describan las regularidades del proceso conocido como deformación plástica superficial por rodillo simple, empleando como materia prima el acero AISI 1045.

El objetivo del capítulo es realizar la valoración crítica de los resultados y a través de ella, explicar los fundamentos científicos que dan solución al problema planteado a partir de la interpretación de las regularidades observadas.

### 3.2. Análisis del diámetro antes y después del proceso de deformación

El efecto de la velocidad de rodilado en el porcentaje de incremento de la microdureza aumenta, cambia en el diámetro de la pieza y la variación en la falta de redondez, este efecto puede ser observado en la figura 3.1 y los resultados de los cálculos en el anexo1.

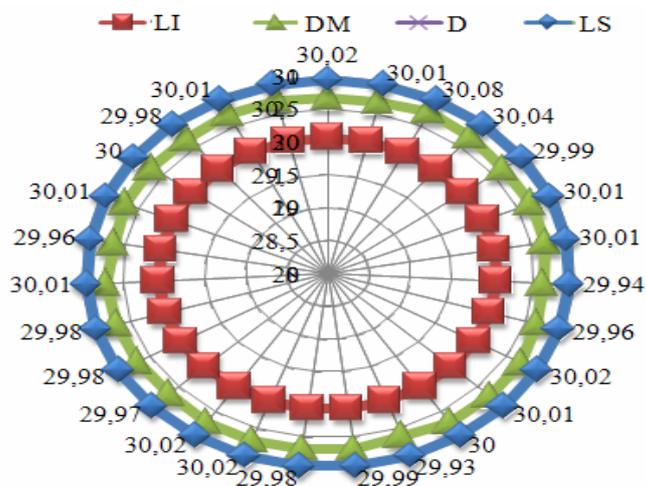


Figura 3.1. Variación en el diámetro

Como se observa en la figura anterior las diferencias del diámetro antes y después del tratamiento varían en pequeños intervalos, margen muy estrecho para procesos tradicionales de acabado, como el rectificado, pues corresponde a un grado de tolerancia (IT) muy pequeño que se ajusta al rango de las operaciones de acabado.

Puede decirse entonces que el tratamiento no influye de manera significativa en la disminución del diámetro. La existencia de una pequeña disminución del diámetro está determinada por la capacidad del acero AISI 1045 para ser deformado bajo el efecto de los parámetros de deformación.

### 3.3. Parámetros de deformación plástica superficial por rodillo

El proceso de deformación plástica superficial con rodillo contempla parámetros como las tensiones de proporcionalidad en la zona de contacto, la profundidad del endurecimiento, las tensiones máximas por contacto y por aplastamiento y el estado de tensión en la zona de contacto con la superficie deformada.

#### 3.3.1. Análisis de las tensiones de proporcionalidad

Las tensiones de proporcionalidad (ecuación 2.3), para las fuerzas de 500; 1500 y 2500 N, fue necesario determinar el coeficiente que tiene en cuenta los radios del rodillo y de la pieza (anexo 2), para lo que se empleó la ecuación 2.4. Los radios obtenidos se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Radios del rodillo y de la pieza

Fuerza (N)	R1	R2 (mm)	Módulo de elasticidad
500	25	14,30	$E = 2,1 \times 10^5 \text{ MPa}$
1 500		13,80	
2 500		13,30	

La figura 3.2 muestra el comportamiento de las tensiones de proporcionalidad (anexo 3) en relación a la dureza.

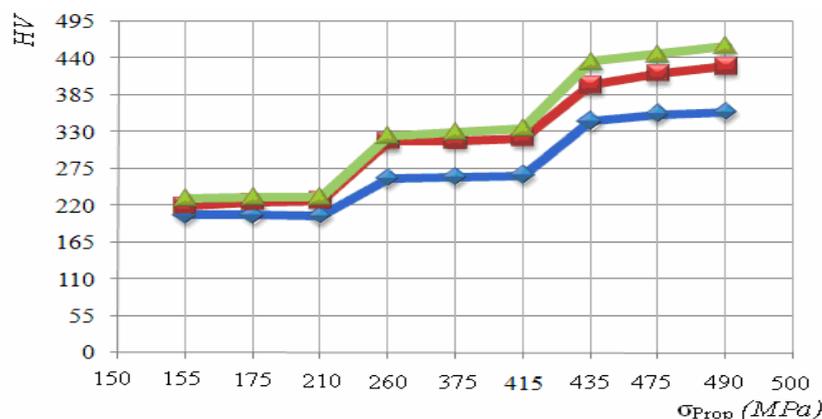


Figura 3.2. Comportamiento de las tensiones de proporcionalidad vs dureza.

Las curvas ajustadas para cada comportamiento son:

$\sigma_{prop(500)} = 22,58x+161,4$  y un coeficiente de correlación  $R^2 = 0,904$  (azul)

$\sigma_{prop(1500)} = 29,28x+172,6$  y un coeficiente de correlación  $R^2 = 0,935$  (rojo)

$\sigma_{prop(2500)} = 32,7x+172,6$  y un coeficiente de correlación  $R^2 = 0,927$  (verde)

Como se observa en la figura 3.2, la dureza se incrementa en la misma medida que lo hacen las tensiones de proporcionalidad, para diferentes valores de tensiones la dureza tiene un comportamiento lineal ascendente, lo que justifica el endurecimiento de la aleación bajo la capa deformada. Los cambios de las tensiones en la red cristalina se verán influenciados por la magnitud de las cargas impuestas al material y la velocidad de aplicación de dichas cargas (esfuerzos de tracción y compresión), los átomos constituyen barreras u obstáculos al movimiento de las dislocaciones, lo que fue expuesto por Fernández *et al.* (2009 y 2010).

Se realizó el análisis estadístico para determinar la influencia que tienen las tensiones de proporcionalidad en el endurecimiento superficial del acero AISI 1045 cuando se somete a proceso de deformación plástica superficial con rodillo, para ello se consideró las distintas fuerzas (500; 1 500 y 2 500 N). Los resultados de dicho análisis se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Análisis de regresión múltiple

Parámetro	Estimación	estándar	T	P-Valor	
CONSTANTE	- 116,145	192,577	- 0,60311	0,0482	
Fuerza 500	4 749,41	4 434,75	1,07095	0,2875	
Fuerza 1 500	- 561,948	2 149,2	- 0,261468	0,7944	
Fuerza 2 500	-1687,77	2 329,62	- 0,724486	0,4710	
Análisis de Varianza					
Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Cociente-F	P-Valor
Modelo	38 457,6	3	12 819,2	2,01	0,5191
Residuo	490 392,0	77	6 368,72		
Total (Corr.)	528 849,0	80			
R-cuadrado = 0, 927194 %					
Error estándar de est. = 79,8043					
Error absoluto medio = 66,6178					
Estadístico de Durbin-Watson = 0,966 783 (P = 0,0000)					

La salida muestra los resultados del ajuste a un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre la dureza y 3 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{Dureza} = - 116,145 + 4749,41 * \sigma_{\text{prop}(500)} - 561,948 * \sigma_{\text{prop}(1500)} - 1687,77 * \sigma_{\text{prop}(2500)}$$

Dado que el p-valor en la tabla ANOVA es menor o igual a 0,01; existe relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 90 % o superior.

El estadístico R-cuadrado indica que el modelo explica un 92,7194 % de la variabilidad en la dureza. El estadístico R-cuadrado ajustado, que es más conveniente para comparar modelos con diferentes números de variables independientes, es 3,65916 %. El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos que es 79,8043. El error absoluto medio (MAE) de 66,6178 es el valor medio de los residuos. El estadístico Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se han introducido los datos en el fichero. Dado que el p-valor es inferior a 0,05; hay indicio de una posible correlación serial.

### 3.3.2. Comportamiento de las tensiones con relación a los radios

A partir de la expresión (2.4) se procedió analizar la influencia que tenían los radios de curvaturas del rodillo y de la pieza, sobre la magnitud de la zona deformada manteniendo constante el resto de los parámetros que intervienen en la expresión (figura 3.3).

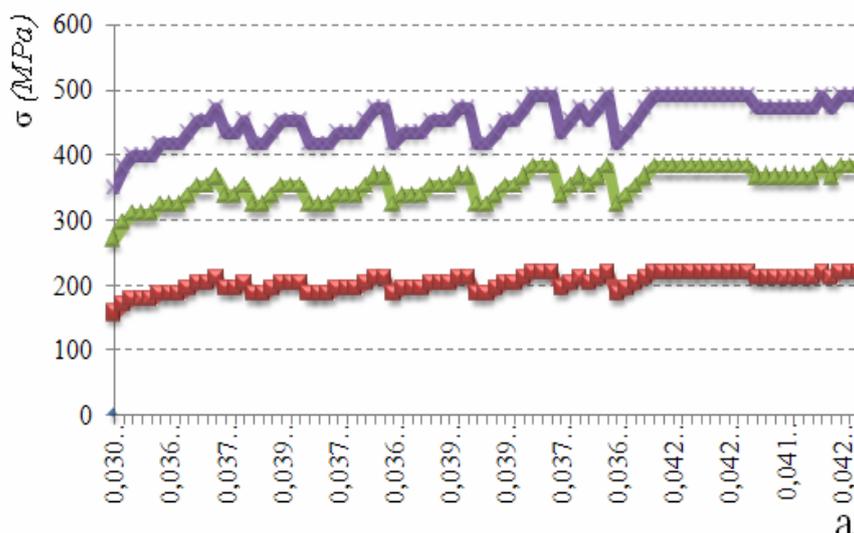


Figura 3.3. Comportamiento de las tensiones con relación a los radios.

Puede ser apreciado en la figura 3.3, que la tensión residual en la superficie rodilada es baja y aumenta muy rápidamente con un aumento en la profundidad debajo de la superficie deformada hasta una máxima tensión residual de tracción (a fuerzas bajas), entonces disminuye gradualmente con un aumento mayor en la profundidad convirtiéndose en vanamente pequeña.

La variación de la máxima tensión residual a diferentes radios de la pieza, se observa que un incremento en el radio hasta 0,042 (anexo 3) provoca un aumento significativo en la máxima tensión residual compresiva. La tensión entonces disminuye gradualmente con un aumento mayor en la profundidad debajo de la superficie rodilada convirtiéndose en despreciable a lo largo de la profundidad. Al adquirir mayor dureza el acero ofrece mayor resistencia a ser deformado, existe menor profundidad en la capa deformada, pero si un mayor incremento de la fuerza y de la tensión residual.

El análisis estadístico de la variabilidad de las tensiones en relación a los radios del rodillo y de la pieza se muestra en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Análisis de regresión múltiple

Parámetro	Estimación	estándar	T	P-Valor	
CONSTANTE	- 621,27	366,364	- 1,69577	0,1023	
Radios	23123,6	8891,16	2,60074	0,0154	
Análisis de Varianza					
Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Cociente-F	P-Valor
Modelo	68124,9	1	68 124,9	6,76	0,0154
Residuo	251 798,0	25	10 071,9		
Total (Corr.)	319 923,0	26			
R-cuadrado = 21,2942 %					
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 18,1459 porcentaje					
Error estándar de est. = 100,359					
Error absoluto medio = 82,7198					
Estadístico de Durbin-Watson = 0,252703 (P=0,0000)					
Autocorrelación residual en Lag 1 = 0,825504					

La salida muestra los resultados del ajuste a un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre la tensión y 1 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es:

$$\sigma_{prop} = -621,27 + 23123,6 \cdot a$$

El p-valor en la tabla ANOVA es inferior a 0,05; existe relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 95 %.

El estadístico R-cuadrado indica que el modelo explica un 21,2942 % de la variabilidad en los radios. El estadístico R-cuadrado ajustado, que es más conveniente para comparar modelos con diferentes números de variables independientes, es 18,1459 %. El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos que es 100,359. Este valor puede usarse para construir los límites de predicción para las nuevas observaciones.

El error absoluto medio (MAE) de 82,7198 es el valor medio de los residuos. El estadístico Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se han introducido los datos en el fichero. Dado que el p-valor es inferior a 0,05; hay indicio de una posible correlación serial.

Para decidir la simplificación del modelo, tenga en cuenta que el p-valor más alto en las variables independientes es 0,0154, perteneciendo a variación en los radios. Puesto que el p-valor es inferior a 0,05; ese término es estadísticamente significativo para un nivel de confianza del 95 %.

### 3.3.3. Profundidad de la capa endurecida

La profundidad de la capa endurecida (figura 3.4), donde se consideran las fuerzas empleadas en el proceso de endurecimiento y una tensión de fluencia del material de 415 MPa (según norma ASTM), se determinó por la ecuación 2.5.

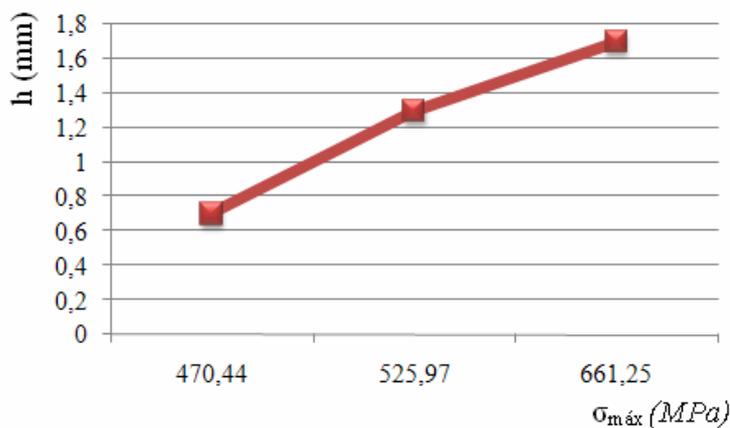


Figura 3.4. Comportamiento de la capa endurecida relación con las tensiones.

La curva ajustada para este comportamiento es:

$$h = 0,5 + 0,2333 \text{ y un coeficiente de correlación } R^2 = 98$$

El aumento de la fuerza de rozamiento incrementa el efecto de la deformación plástica, a la misma vez que la penetración del rodillo es desde 0,7 mm hasta 1,7 mm, reportado por Fernández *et al.* (2008a y 2009). Esto conducirá a la fatiga residual interna del material y un cambio considerable en los parámetros de la dureza en la superficie. La mayor dureza en la superficie se obtiene como resultado del crecimiento de la penetración de la herramienta en la aleación. Bajo fuerza de rozamiento constante, el rodillo penetra y alisa la superficie, lo que causa una mayor deformación plástica debido a la pequeña área de contacto entre el rodillo y la pieza, lo que concuerda con Loh *et al.* (1989) y Fang-Jung y Chien-Hua (2003), quienes consideran que la profundidad de la capa deformada durante el proceso de deformación plástica se encuentra entre 1 y 10 mm.

### 3.3.4. Comportamiento de las tensiones máximas

El aumento en las tensiones máximas provoca un aumento en la suma de deformación superficial con incremento de la dureza como se observa en la figura 3.5. Las tensiones máximas calculadas por la ecuación 2.6 (anexo 4) se analizaron para las diferentes fuerzas de deformación (500; 1 500 y 2 500 N) como se observa en el anexo 4.

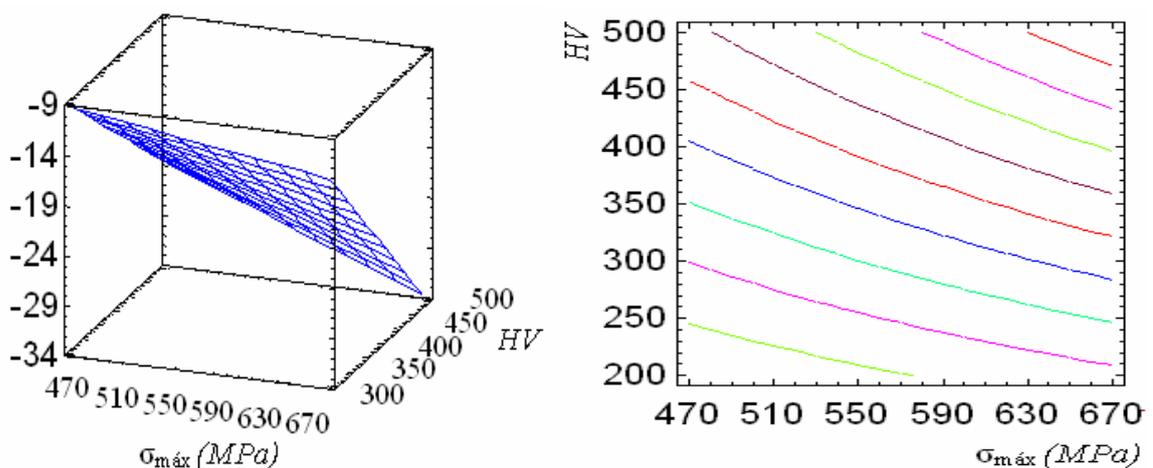


Figura 3.5. Comportamiento de la dureza en relación a las tensiones máximas.

Como se aprecia en la figura 3.5 las tensiones máximas a lo largo de la superficie de la pieza, conduce a un aumento en el endurecimiento de las capas superficiales, las cuales han sido afectadas por la deformación plástica, además que la dureza superficial aumentará por la vía del aumento de la fuerza de rodilado.

Las tensiones máximas caracterizan el comportamiento de los esfuerzos, se observa que en la medida que la dureza y la profundidad de penetración se incrementan, también lo hacen dichas tensiones máximas. Otro comportamiento determinado es, que las mismas crecen en la medida que aumenta la fuerza de compresión y disminuye el radio de curvatura del rodillo, reforzando lo planteado por Fernández *et al.* (2008; 2009b y 2010).

En la tabla 3.4 se muestra el análisis estadístico del comportamiento de la dureza en relación a las tensiones máximas.

Tabla 3.4. Análisis de regresión del comportamiento de las tensiones máximas

Análisis de regresión					
Variable dependiente: Dureza					
Variable independiente: Tensiones máximas					
Error Estadístico					
Parámetro	Estimación	estándar	T	P-Valor	
Ordenada	-121,39	57,5711	-2,10852	0,0729	
Pendiente	2,21849	0,274651	8,07747	0,0001	
Análisis de la Varianza					
Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Cociente-F	P-Valor
Modelo	62 503,1	1	62 503,1	65,25	0,0001
Residuo	6 705,78	7	957,968		
Total (Corr.)	69 208,9	8			
Coeficiente de Correlación = 0,95032					
R-cuadrado = 90,3108 %					
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 88,9266 %					
Error estándar de est. = 30,9511					
Error absoluto medio = 23,823					
Estadístico de Durbin-Watson = 2,02802 (P=0,3032)					
Autocorrelación residual en Lag 1 = - 0,0899396					

La salida muestra los resultados del ajuste al modelo lineal para describir la relación entre la dureza y las tensiones máximas. La ecuación del modelo ajustado es:

$$Dureza = -121,39 + 2,21849 \cdot \sigma_{m\acute{a}x}$$

Dado que el p-valor en la tabla ANOVA es inferior a 0,01; existe relación estadísticamente significativa entre la dureza y las tensiones máximas para un nivel de confianza del 95 %.

El estadístico R-cuadrado indica que el modelo explica un 90,3108 % de la variabilidad en la dureza. El coeficiente de correlación es igual a 0,95032, indicando una relación relativamente fuerte entre las variables. El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos que es 30,9511. Este valor puede usarse para construir límites de la predicción para las nuevas observaciones.

El error absoluto medio (MAE) de 23,823 es el valor medio de los residuos. El estadístico Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se han introducido los datos en el fichero.

### 3.3.5. Tensiones máximas de aplastamiento

Las tensiones máximas al aplastamiento fueron calculadas por la ecuación 2.8. En la figura 3.6 se muestra el comportamiento de la dureza en relación a las tensiones máximas de aplastamiento.

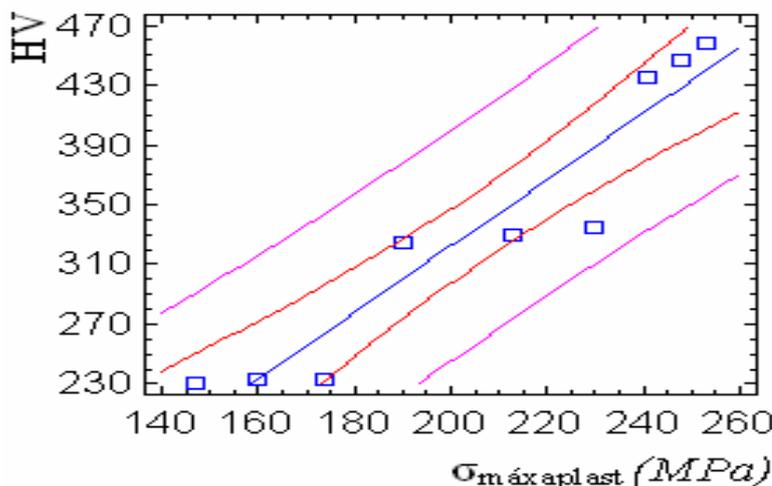


Figura 3.6. Comportamiento de la dureza en relación a las tensiones máximas de aplastamiento.

La curva ajustada para este comportamiento es:

$$HV = 0,5 + 0,2333 \text{ y un coeficiente de correlación } R^2 = 92$$

En la figura 3.6 se puede apreciar el incremento de forma lineal de la dureza en relación a las tensiones máximas de aplastamiento. Para analizar las mismas se parte del hecho que los cuerpos son elásticos y al presionarlos se crean áreas de contacto finitas pero tan pequeñas que los esfuerzos a la compresión correspondientes son extremadamente altos y la resistencia a la fatiga es alta porque el proceso permite orientar las fibras y también la resistencia al desgaste es alta porque la red cristalina está casi intacta, entonces el aplastamiento de los granos deforma la estructura y provocan las dislocaciones.

### 3.4. Resultados de la simulación por el Método de los Elementos Finitos

Para evaluar el comportamiento se escogieron los resultados de mayor incidencia en el proceso, los cuales consideramos que lo constituyen el avance de 0,25 mm/rev y el mayor número de revoluciones 110 rev/min.

La figura 3.7 se obtuvo aplicando las cargas en el centro de la pieza como el lugar donde existe mayor tendencia a la deformación plástica, se puede observar el comportamiento microestructural del material deformado en correspondencia con las tensiones, al aplicar fuerza de 500 N, avance de 0,25 mm/rev y 110 rev/min.

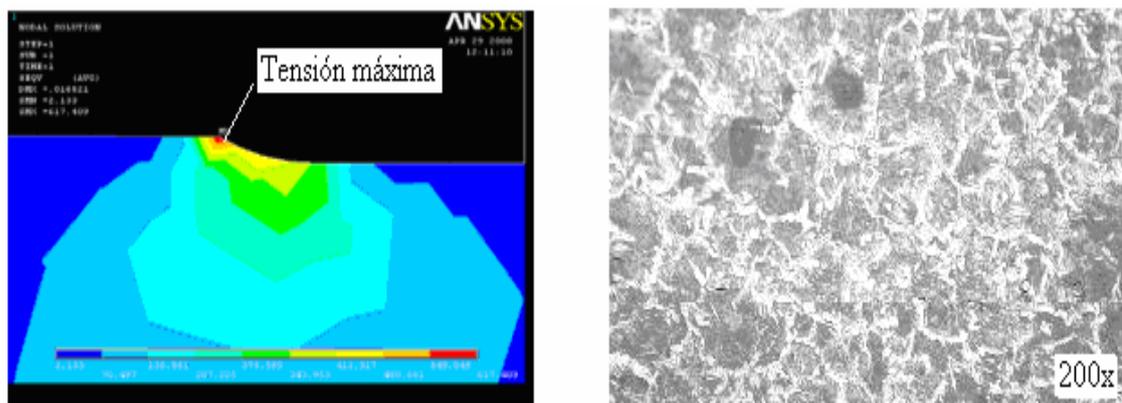


Figura 3.7. Comportamiento de la microestructura en relación a la tensión con fuerza de 500 N.

Para valores de fuerza de 500 N, en el acero AISI 1045, las tensiones ocurren con pequeños valores de deformación, se comienza a deformar el material, esta fuerza

no es suficiente para transformar completamente la estructura interna de los granos, pero se crean las condiciones para provocar el sistema de deslizamiento que deforma el retículo cristalino y provocar el endurecimiento del material.

La figura 3.8 muestra el procedimiento con fuerza de 1 500 N; S de 0,25 mm/rev y 110 rev/min y relaciona el comportamiento microestructural en correspondencia con los parámetros de deformación empleados.

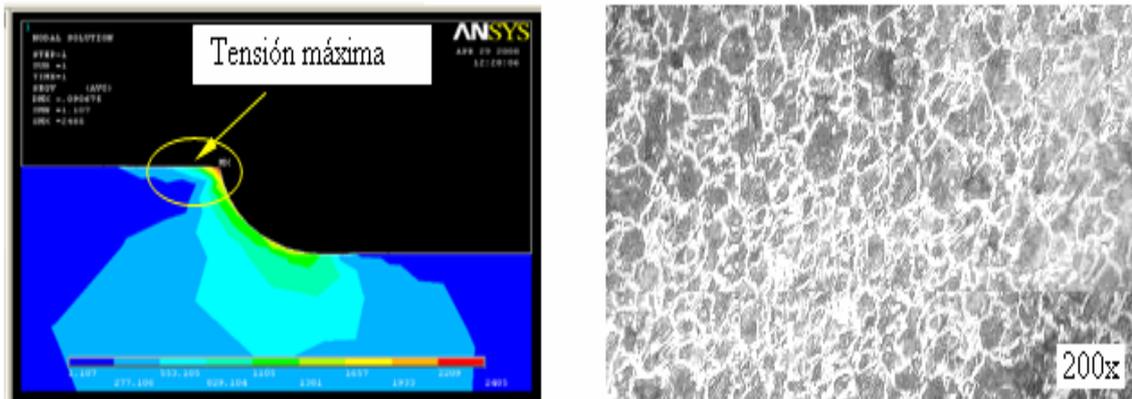


Figura 3.8. Comportamiento de la microestructura en relación a la tensión con fuerza de 1500 N.

En el nivel medio, con el aumento de la fuerza hasta 1 500 N y el número de revolución, existe una mayor penetración del rodillo sobre la superficie de la pieza y un incremento en los valores de tensión, lográndose una mayor agrupación de los granos en la red cristalina, con el incremento de las variables se obtiene una estructura de granos más homogéneo, en la medida que el material se va deformando.

Con la reducción del tamaño promedio de los granos, se han creado las condiciones para provocar las dislocaciones, las cuales son las causantes de la deformación del material en frío.

En la figura 3.9, se muestra el comportamiento microestructural y de las tensiones en el material para fuerza de 2 500 N, S de 0,25 mm/rev y con 110 rev/min.

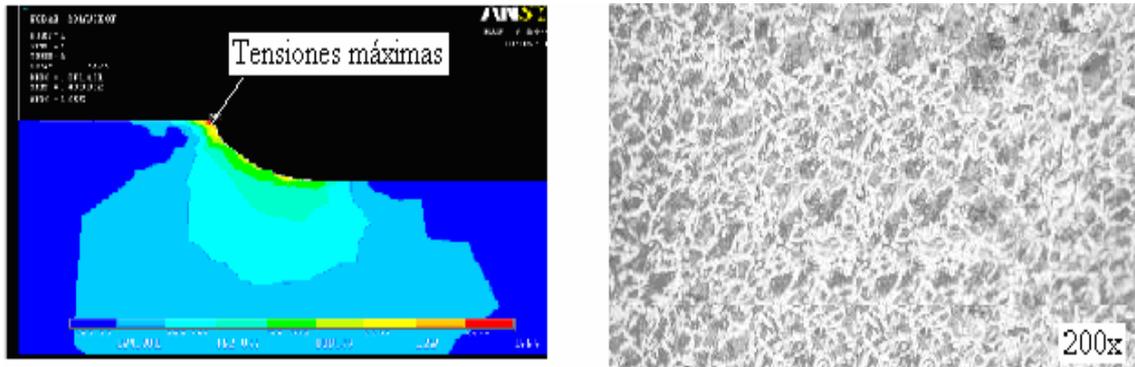


Figura 3.9. Comportamiento de la microestructura en relación a la tensión con fuerza de 2 500 N.

En el máximo nivel con el empleo de fuerza de 2 500 N, existe mayor compactación de los granos y una estructura de granos más homogéneo, esto está motivado por el incremento de las tensiones de compresión originadas debajo de la capa deformada.

Haciendo una comparación entre las figuras de simulación, los valores de tensiones aumentan con el incremento de la fuerza y la profundidad, en la medida que se va deformando el material. Luego del proceso de deformación del acero AISI 1045 se incrementan las dislocaciones y la acritud, que provocan la reducción del tamaño promedio de los granos. Los límites de los granos se hacen más finos convirtiéndose en barreras u obstáculo que frenan el movimiento de las dislocaciones, por lo que el material quedará endurecido superficialmente.

Los resultados de la simulación muestran que las máximas tensiones se localizan en la parte superior de la superficie deformada, al entrar en contacto con el rodillo durante su desplazamiento, desde los valores máximos (color rojo), hasta valores mínimos (color azul).

### 3.5. Valoración económica

La contabilidad de costos, que de una determinación histórica del costo de la producción basado en la materia prima, la mano de obra y los gastos indirectos de producción, ha desembocado en sistemas de costos predeterminados de tipo estimado o de tipo estándar, mediante los cuales el costo de los artículos



no se obtiene al finalizar el proceso productivo, si no se calcula de antemano y sirve de base de control y eficiencia.

Neuner (1971), considera que la contabilidad de costos es una fase del procedimiento de contabilidad general, por medio de la cual se registran, resumen, analizan e interpretan los de costos de material, mano de obra, cargos indirectos y costos ajenos a la producción necesarios para producir y vender un artículo.

La contabilidad de costos se ocupa de la planeación, clasificación, acumulación, control y asignación de costos. La contabilidad de costos constituye el complemento amplificado y necesario de la contabilidad financiera, que tiene por objeto brindar información de los hechos en el momento preciso para tomar decisiones respecto a maximizar beneficios o minimizar costos.

Para la realización del análisis económico tomaremos como referencia el tiempo de ejecución obtenido durante cálculo de los parámetros de trabajo en la computadora para la simulación del proceso. En la tabla 3.5 se recoge el comportamiento de los costos.

Tabla 3.5. Costo por concepto de tiempo y consumo

Por concepto de tiempo				Por concepto de consumo				
	Tarifa (\$/h)	Tiempo (h)	Costo <sub>Ti</sub> (\$)	Cantidad de equipos	Consumo (kW/h)	Tarifa (\$/kW)	Tiempo (h)	Costo <sub>Co</sub> (\$)
Técnico	2,34	2	4,68	2 - lámparas 2 - Aire acondicionado	0,8 0,25 1,12	0,09	2	0,19
Costo Total para la realización de la simulación.			$C_T = \text{Costo}_{Ti} + \text{Costo}_{Co}$ $C_T = \$ 4,87$					

Como se aprecia en la tabla 3.5, el gasto en el que se incurre trabajando con el software ANSYS para la simulación del proceso de las tensiones del acero AISI 1045 deformado por rodadura es de \$ 4,87; por lo que se puede considerar un costo relativamente pequeño considerando la importancia que reviste la deformación plástica, como alternativa de disminuir el empleo de los tratamientos térmicos convencionales.



### **3.6. Valoración del impacto ambiental**

La contaminación ambiental puede ser provocada por causas naturales (emisión de partículas y gases por incendios forestales, volcanes, o la descomposición de residuos sólidos naturales como el excremento), esta contaminación se le conoce como telúrica, la misma puede ser reciclada por la naturaleza, a diferencia de la provocada de forma antropogénica o sea por el hombre; que en su afán de desarrollo a cualquier precio ha acelerado esta contaminación, fundamentalmente por la industrialización de sus producciones y con esto ha agravado los problemas ambientales que nos afectan; que ya no se limitan a la tradicional extinción de la flora y la fauna, sino que van un poco más allá; por ejemplo: la destrucción de la capa de ozono; el aumento del efecto invernadero; las lluvias ácidas; la tala indiscriminada; la erosión de los suelos; la contaminación de las aguas terrestres y marinas, los suelos y la atmósfera; la destrucción del patrimonio histórico-cultural, entre otros; a tal punto, que amenaza seriamente el balance de los ecosistemas del planeta y la propia existencia del ser humano.

Uno de los principales cambios hasta la fecha lo ha sufrido la atmósfera. Hemos cambiado y continuamos cambiando el balance de gases que forman la misma. Esto es especialmente notorio en gases como el CO<sub>2</sub>, Metano (CH<sub>4</sub>) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O). Estos gases naturales son menos de una décima de un 1 % del total de gases de la atmósfera y responsables del efecto invernadero, pero son vitales pues actúan como una "frazada" alrededor de la Tierra". Sin esta capa la temperatura mundial sería 30 °C más baja, lo que haría casi imposible la vida.

Teniendo en cuenta que la mayoría de las emisiones de dióxido de carbono son provocadas por la generación de energía eléctrica, el degradante estado actual de los recursos energéticos en el ámbito mundial y analizando que mientras menos consumamos energía eléctrica, menos habrá que generar, nuestro país desde su condición de subdesarrollado, ha encaminado una serie de cambios favorables, como el reemplazo de la tecnología atrasada existente por tecnología más limpia y eficiente entre ellas contamos con los grupos electrógenos, el biogás, la energía eólica y la solar.



El empleo de tratamientos térmicos para lograr dureza superficial en las piezas, conlleva al menos a un mayor consumo de electricidad, donde casi siempre la pieza adquiere un temple volumétrico (como en el caso del temple y revenido) con el lógico despilfarro de portadores energéticos, también porque emplean equipos que son altamente consumidores.

Adicionalmente, para diferentes variantes de tratamiento térmicos se utilizan en ocasiones una serie de productos químicos y de combustibles, sólidos y gaseosos que generan gases contaminantes al medio ambiente (vapores de sales, monóxido de carbono), además de desechos sólidos (grasas sólidas, aceites, restos de combustibles líquidos), también es conocido que la mayor parte de los residuos, generados por la industria de tratamiento térmico, proviene de soluciones de cianuro, de agentes enfriadores empleados, aguas residuales, de medios abrasivos, de material refractario y procesos de revestimiento, que en mayor o menor medida, afectan sensiblemente a la salud humana y son potencialmente peligrosos como agentes contaminantes del entorno.

Las implicaciones económicas y sociales que esto representa son universalmente conocidas, así como de los esfuerzos que a numerosas instancias se hacen en Cuba para disminuir el impacto negativo que estas tecnologías poseen.

La aplicación del proceso tecnológico conocido como deformación plástica superficial por rodillo, en muchos casos, evita o hace innecesario el empleo de las tecnologías contaminantes del medio ambiente y altos consumos de energía, las propiedades físico – mecánicas se pueden lograr de las reservas internas del material, que se manifiestan a partir de la deformación en frío de su superficie en forma controlada.

El proceso posee la ventaja adicional de que no induce efectos colaterales negativos en la pieza como en el caso del temple, donde hay que aplicar tratamientos adicionales, para eliminar las tensiones surgidas. Se disminuye también el nivel de ruido.



### **3.7. Conclusiones del capítulo 3**

- ✓ La interrelación entre el rodillo y la superficie deformada provocan tensiones de compresión y tracción, así como variaciones en la macro y microdeformación por efecto de la deformación de la estructura cristalina.
- ✓ Al determinar la relación tensión – deformación del acero AISI 1045 sometido a deformación superficial por rodadura en frío se apreció que según los análisis estadísticos el perfil del rodillo incrementa las tensiones debajo la capa deformada.
- ✓ Los resultados obtenidos con el Método de los Elementos Finitos, permiten estimar la deformación reticular de la estructura cristalina del acero AISI 1045 para distintos valores de fuerzas.



## CONCLUSIONES GENERALES

- ✓ Se determinó la variación del diámetro de la pieza antes y después del proceso de deformación, lo cual muestra que la reducción del mismo es de 0,06 mm, lo cual no es tan significativo después de aplicar fuerza máxima de 2 500 N.
- ✓ La variación del diámetro de la pieza, los radios del rodillo, la profundidad de la capa endurecida, permitieron determinar la influencia de las tensiones sobre la dureza de la capa superficial del acero AISI 1045 deformado por rodillo simple.
- ✓ A partir del análisis estadístico, el Método de los Elementos Finitos y el análisis metalográfico, fue posible determinar la distribución de tensiones en la superficie de las muestras deformadas por rodillo simple.
- ✓ El tiempo estimado para la realización de la simulación por el Método de los Elementos Finitos que permitieron establecer el comportamiento de las tensiones fue de \$ 4,87.



## RECOMENDACIONES

- ✓ Determinar a partir del empleo del perfil de otro rodillo, el comportamiento de las tensiones superficiales en piezas deformadas por rodillo simple.
- ✓ Determinar con el empleo de la ecuación  $\sigma_{RE} = \frac{P_{máx}}{F_0}; MPa$ , el comportamiento de la resistencia estática de piezas sometidas a proceso de deformación plástica superficial.
- ✓ Profundizar en el estudio del comportamiento de la rugosidad superficial que queda en la superficie deformada luego del proceso de deformación plástica por rodillo simple.

# Referencias bibliográficas



### **Referencias bibliográficas**

1. Alcántara, D., Comportamiento microestructural del acero AISI 1045 mediante la deformación plástica superficial por rodadura. Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Mecánico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2007.
2. Alcántara, D.; Fernández, T.; Rodríguez, I., Comportamiento de las capas deformadas por rodadura en los equipos de laboreo minero. 21 (01) 26 – 32, 2008(a). [www.uni.edu.ni/Nexo](http://www.uni.edu.ni/Nexo). Consultado el 4 de julio 2008.
3. Alcántara, D.; Fernández, T.; Rodríguez, I., Comportamiento de las capas superficiales deformadas plásticamente por el desgaste en elementos circulares. 17 (4) 1 – 4, 2008(b). <http://www.ciencias.holguin.cu/> Consultado el 2 de Febrero de 2009.
4. Alfaro, W. Simulación de procesos. En: <http://www.monografias.com/trabajos6/>. 2001.
5. Askeland, D., Ciencia e Ingeniería de los materiales. Edición Iberoamericana. Tercera Edición. México. 1985. pp 83 – 97.
6. Bathe, J. Finite element procedures; Prentice Hall. 1996.
7. Bengton, U., Design requirements materials properties a basic for materials selection. American society for testing. USA: 8 (2) 230 – 250, 1991.
8. Box, G.; Hunter, W.; Hunter, J., Estadística para experimentadores. Editorial Reverté. Barcelona, 1989.
9. Boyle, J.; Spence, J., Stress analysis for creep. Londres. Butterworths, 1989.
10. Callister, W., Materials Science and Engineering. An Introduction. Fifth Edition. Department of Metallurgical Engineering, University of Utah. John Wiley & Sons, Inc. 1999. 8 195 pp.
11. Camejo, D., Cálculo de costo del proceso de deformación plástica superficial por rodadura. Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Mecánico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica, 2008.
12. Courtin, S.; Henaff-Gardin, C.; Bezine, G., Finite element simulation of roller burnishing in crankshafts, Computational Mechanics Publications, Surface



- Treatment VI: Computer Methods and Experimental Measurements, pp 333 – 342, 2003, USA.
13. Cullity, B., Elements of x - Ray Diffraction, Addison Wesley, 2nd ed., 1972, p 470.
  14. Chen, C., Ball Burnishing of Plastic Die Casting Steel, Master thesis, National Taiwan University of Science and Technology, 2001.
  15. Davidienkov, N., Analysis of the state of stress in the neck of a tension test specimen. En Proceedings of American Society of Testing Materials. Tomo 46, pp 1147 – 1158, 1946.
  16. DeLitizia, A., Influence of Shot Peening on the Residual Stresses in Spring Steel Plate, Second International Conference on Shot Peening, 1984.
  17. Díaz, S., Implementación de un procedimiento metodológico para la elaboración de piezas por bruñido con rodillo simple. Tesis presentada en opción al grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas. Universidad Central Martha Abreu Las Villas, 2006.
  18. Díaz, L., Desgaste por rodadura en los pasadores de esteras de los tractores KOMATSU D 85 P – 21. Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Mecánico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica, 2007.
  19. Dieter, G. Mechanical Metallurgy, Editorial Mc Graw – Hill, 1988.
  20. Dogan, O.; Hauk, J.; Laird, G., Solidification Structure and Abrasion Resistance of High Chromium White Irons Metallurgical and Materials Transactions A. 28 (3) 23 – 28, 1997.
  21. Dorofev, Y., Production of regular micro – relief by a cycloidally moving tool, Soviet Engineering Resource. 6 (5) 11 – 13, 1986.
  22. El - Axir, M., An investigation into roller burnishing. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 40 (11) 1603-1617, 2000.
  23. El - Axir, M., Some surface characteristics due to center rest ball burnishing. Journal of Materials Processing Technology. 167 (1) 47 - 53, 2005.
  24. El - Khabeery, M.; El - Axir, M., Experimental techniques for studying the effects of milling roller-burnishing parameters on surface integrity.



- International Journal of Machine Tools and Manufacture. 41 (12) 1705 – 1719, 2001.
25. Ferré, J.; Rius, F., Técnicas de Laboratorio, 274 648 - 652. 2002.
26. Fernández, A., Elaboración de una ficha de costos para el proceso de deformación plástica en frío por rodadura. Trabajo de Diploma en opción al título de Licenciado en Contabilidad. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Humanidades, 2011.
27. Fernández, T.; Rodríguez, I.; Alcántara, D.; Fernández, E., Procedimiento para endurecer el acero 45 mediante la deformación plástica con rodillo simple. Revista Ingeniería e Investigación. 28 (1) 15 – 21, 2008(a).
28. Fernández, T.; Rodríguez, I.; Alcántara, D., La Deformación Plástica Superficial por rodadura como método de endurecimiento. Nexo. 21 (01) 76 – 82, 2008(b). [www.uni.edu.ni/Nexo](http://www.uni.edu.ni/Nexo). Consultado el 4 de julio 2008.
29. Fernández, T.; Rodríguez, I.; Alcántara, D., Estructura cristalina del acero AISI 1045 deformado plásticamente. Revista Ciencias Holguín. 14 (4) 27 – 34, 2008(c).
30. Fernández, T.; Rodríguez, I.; Alcántara, D., Variaciones mecánicas superficiales del acero AISI 1045 endurecido superficialmente por rodadura. V Conferencia Internacional de Aprovechamiento de Recursos Minerales. CINAREM´2009. Noviembre 2009(a).
31. Fernández, T.; Rodríguez, I.; Alcántara, D., Tensión – Deformación durante la deformación plástica superficial con rodillo. Revista de Ingeniería Mecánica. 12 (3) 13 - 22, 2009(b).
32. Fernández, T.; Rodríguez, I.; Alcántara, D., Variaciones mecánicas superficiales del acero AISI 1045 endurecido superficialmente por rodadura. Revista Geología Minería. 26 (3) 65 – 74, 2010.
33. Guliaev, A., Metalografía. Tomo I. Moscú. Editorial Mir. 1983. pp 53 – 89.
34. Guliaev, A., Metalografía. Tomo II. Moscú. Editorial Mir. 1983. pp 17 – 22.
35. Gutiérrez, F.; De la Vara, R., Análisis y Diseño de Experimentos, Mc Garw Hill, 1ª edición. México. 2003. pp 237 – 264.



36. Hernández, S. "Metodología de la Investigación." Editorial McGraw-Hill. México. 1997.
37. Hernández, H., Estudio del comportamiento del acero AISI 1045 mediante la deformación plástica por rodadura. Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Mecánico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica, 2005.
38. Hernández, L., Exponente de endurecimiento  $n$  en probetas deformadas por rodillos y traccionadas. Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Mecánico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica, 2010.
39. Huang, H.; Usmani, A. Finite element analysis for heat transfer; Springer-Verlag. 1994.
40. Ingham, T.; Moreland, E. The Influence of Time-dependent Plasticity on elastic-plastic fracture toughness. En: ASTM STP 803, Vol. I, 1983.
41. Jiménez, M., Simulación del proceso de Deformación Plástica por Rodadura por el Método de Elementos Finitos. Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Mecánico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica, 2007.
42. Lebedko, A., Increasing the service life of textile machinery by surface strain hardening, Metallovedenie Termicheskoe Obrabotka Met. 2 (4) 54 – 55, 1982.
43. Lee, S., An investigation into the ball burnishing of an AISI 1045 free-form surface. Journal of Materials Processing Technology, 29 (1-3) 203 – 211, 1992.
44. Key to Steel, Influence of Alloying Elements on Steel Microstructures. Key to Steel Web Site. 2002. Disponible en la World Wide Web en <http://www.Key-to-steel.com/>. Consultado el 20 de Octubre de 2008.
45. Kukielka, L., Designating the field areas for the contact of a rotary burnishing element with the rough surface of a part, providing a high quality product, Journal of Mechanical Technology. 19 (3) 319 – 356, 1989.



46. Kuznezov, A.; Macximov, I.; Giudice, E., Working by combined cutting and plastic deformation: Proposal of a mathematical model, 23 (12) 75 – 79, 1986.
47. Lajtin, Y., Metalografía y tratamiento térmico de los metales. Editorial MIR, 1985.
48. Lewis, R., The finite element method in heat transfer analysis; John Wiley & Sons, 1996.
49. Linares, H., Tensiones superficiales en piezas tratadas por el proceso de deformación plástica en frío. Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Mecánico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica, 2010.
50. Mallo, M., Manual teórico práctico del mecánico forjador, Editorial Pueblo y Educación. Cuba. pp 93 – 121 – 145 – 152. 1987.
51. Masubuchi, K., Analysis of Welded Structures, Pergamon Press, Elmsford, N. Y. 1980.
52. Mazein, P.; Prusakov, D.; Tchunin, A., Modelling the residual stresses and deformation during a surface plastic deformation operations. Proceeding of the Chelyabinsk Scientific Center. Issue # 1, (10). Russia. 2001.
53. Negret, Y., Determinación del modelo estadístico – probabilístico para el establecimiento del proceso de deformación plástica superficial por rodillo simple. Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Mecánico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica, 2010.
54. Nikiforov, A.; Volkov, Y.; Kanadze, S.; Gorskij, I., Efficiency of the combined processing in repair technology, Tyazheloe Mashinostroenie. 2 (4) 24 – 27, 2001.
55. Odintsov, L., Fortalecimiento y acabado de las piezas mediante la deformación plástica superficial, Editorial CM, 1987. pp 385 – 422.
56. Ossowska, A.; Labanowski, J.; Zielinski, A., Influence of burnishing treatment on stress corrosion cracking susceptibility of duplex stainless steel, Ochrona Przed Korozja, Volume Special Issue, 485 – 489, 2002.



57. Ostle, B., Estadística Aplicada. Limusa - Wiley, México, 1975, Cap. 10.
58. Pacana, A.; Korzynski, M., Roller burnishing parameters analyses with Taguchi method, scientific bulletins of Rzesow University of Technology. 123 (58) 193 – 199, 2002.
59. Piñeiro, A., Obtención de la curva tenso – deformacional del Acero AISI 1045 endurecido por deformación plástica superficial con rodillo. Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Mecánico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica, 2009.
60. Pero-Sanz, J., Ciencia de los materiales. Metalurgia Física: Estructura y Propiedades, Editorial DUSSAT SA, España. 1992.
61. Pero-Sanz, J., Ciencia de los materiales. Metalurgia Física: Estructura y Propiedades, Editorial DUSSAT SA, 3ra Edición. España. 2000. pp 393 – 502.
62. Pickering, F.; Gladman, Y., Iron and Steel Inst. Spec. Rep. No 81, 1963, p. 10.
63. Ramos, N., Análisis estadístico para determinar el comportamiento de la curva  $\sigma - \epsilon$  en acero endurecido en frío. Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Mecánico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica, 2010.
64. Revé, F., Metodología para determinar el estado tensional del acero AISI 1045 deformado en frío por el método de la cicloide. Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Mecánico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica, 2010.
65. Saavedra, E., Predicción de la evolución de la temperatura durante el tratamiento térmico de materiales metálicos por láser; Anales de la Ingeniería Mecánica. 13 (3) 1759 – 1764, 2000.
66. Sakai, Y.; Tamura, N., Experimental research for estimating erection stress of steel bridge using magnetic anisotropy sensor, proceeding of the SEIKEN SYMPOSIUM Non – Destructive Engineering. 26 (15) 61 – 70, 2000.



67. Sarache, L., Diseño de experimentos y análisis multifactorial aplicado a la industria. Facultad de Ingeniería, Revista Ingeniería Industrial. 4 (5) 585 – 590, 2004.
68. Sugimoto, M., The Past, Present and Future of Ferrites. J. Am. Ceram. Soc. 82 (2) 269 – 280, 1999.
69. Smith, W., Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de los materiales, Mc Graw-Hill, España, 2001.
70. Thomée, V., Galerkin finite element methods for parabolic problems; Springer. 1997.
71. Moreno, P., Una teoría discreta de dislocaciones en redes cristalinas. California Institute of Technology. Universidad de Sevilla. <http://scala.uc3m.es/MANS>. Consultado lunes 28 de febrero de 2005.
72. Prevey, P., Effect of cold work on the thermal stability of residual compression in surface enhanced IN 718, Nickel base alloys, ASM International, Heat Treating Including Advances in Surface Engineering. 1 (2) 426 – 434, 2000.
73. Raimón, O., Comportamiento del acero AISI 1045 deformado por rodadura ante cargas cíclicas de torsión. Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Mecánico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica, 2011.
74. Varela, A., Presentación de Metalurgia Física II. Octubre de 2003. Disponible en el World Wide Web. <http://www.metallography.com/bboard/forum.html>. Consultado el 12 de Octubre de 2008.
75. Weertman, J., Elementary Dislocation Theory, Oxford University Press, 1992.

**Anexos**



## Anexos 1

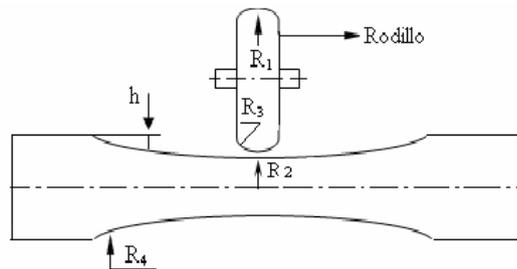
Tabla 1. Variación en los diámetros antes y después del proceso de deformación

No	D	Lím infer	Diám med	Lim sup	No	D	Lím infer	Diám med	Lím sup
1	30,02	29,42	30,06	30,66	42	30	29,42	30,06	30,69
2	30,01	29,42	30,06	30,67	43	29,99	29,42	30,06	30,69
3	30,08	29,42	30,06	30,75	44	30,01	29,42	30,06	30,71
4	30,04	29,42	30,06	30,71	45	29,98	29,42	30,06	30,69
5	29,99	29,42	30,06	30,66	46	29,99	29,42	30,06	30,71
6	30,01	29,42	30,06	30,69	47	30,01	29,42	30,06	30,73
7	30,01	29,42	30,06	30,69	48	30,02	29,42	30,06	30,74
8	29,94	29,42	30,06	30,62	49	29,99	29,42	30,06	30,68
9	29,96	29,42	30,06	30,65	50	29,98	29,42	30,06	30,68
10	30,02	29,42	30,06	30,72	51	29,98	29,42	30,06	30,69
11	30,01	29,42	30,06	30,71	52	30	29,42	30,06	30,70
12	30	29,42	30,06	30,71	53	30,03	29,42	30,06	30,74
13	29,93	29,42	30,06	30,62	54	30,01	29,42	30,06	30,73
14	29,99	29,42	30,06	30,68	55	30,02	29,42	30,06	30,70
15	29,98	29,42	30,06	30,68	56	30,01	29,42	30,06	30,70
16	30,02	29,42	30,06	30,70	57	30,01	29,42	30,06	30,71
17	30,02	29,42	30,06	30,70	58	30,02	29,42	30,06	30,73
18	29,97	29,42	30,06	30,66	59	30,01	29,42	30,06	30,73
19	29,98	29,42	30,06	30,68	60	30,01	29,42	30,06	30,73
20	29,98	29,42	30,06	30,68	61	29,98	29,42	30,06	30,70
21	30,01	29,42	30,06	30,71	62	29,99	29,42	30,06	30,71
22	29,96	29,42	30,06	30,64	63	30	29,42	30,06	30,72
23	30,01	29,42	30,06	30,69	64	29,94	29,42	30,06	30,66
24	30	29,42	30,06	30,68	65	30,03	29,42	30,06	30,75
25	29,98	29,42	30,06	30,67	66	30,01	29,42	30,06	30,73
26	30,01	29,42	30,06	30,70	67	30,01	29,42	30,06	30,73
27	30,01	29,42	30,06	30,70	68	30,02	29,42	30,06	30,74
28	30,02	29,42	30,06	30,72	69	30,01	29,42	30,06	30,73
29	29,97	29,42	30,06	30,68	70	29,99	29,42	30,06	30,70
30	30	29,42	30,06	30,71	71	29,96	29,42	30,06	30,67
31	30,02	29,42	30,06	30,70	72	30	29,42	30,06	30,71
32	30,01	29,42	30,06	30,70	73	30,02	29,42	30,06	30,73
33	30,01	29,42	30,06	30,70	74	29,98	29,42	30,06	30,69
34	29,92	29,42	30,06	30,61	75	29,98	29,42	30,06	30,69
35	30	29,42	30,06	30,70	76	29,99	29,42	30,06	30,70
36	30,01	29,42	30,06	30,71	77	29,99	29,42	30,06	30,71
37	30,01	29,42	30,06	30,71	78	30,01	29,42	30,06	30,72
38	29,98	29,42	30,06	30,69	79	30,01	29,42	30,06	30,73
39	29,99	29,42	30,06	30,70	80	30	29,42	30,06	30,72
40	30,01	29,42	30,06	30,69	81	29,99	29,42	30,06	30,71
41	30,02	29,42	30,06	30,70					

Anexos 2

Tabla 2. Radios del rodillo y de la pieza

	R4			R3	R2			R1
	500	1500	2500		500	1500	2500	
1	69,30	68,70	68,30	2,00	14,30	13,80	13,30	25
2	69,30	68,70	68,30	2,00	14,30	13,80	13,30	25
3	69,30	68,70	68,30	2,00	14,30	13,80	13,30	25
4	69,30	68,70	68,30	2,00	14,30	13,80	13,30	25
5	69,30	68,70	68,30	2,00	14,30	13,80	13,30	25
6	69,30	68,70	68,30	2,00	14,30	13,80	13,30	25
7	69,30	68,70	68,30	2,00	14,30	13,80	13,30	25
8	69,30	68,70	68,30	2,00	14,30	13,80	13,30	25
9	69,30	68,70	68,30	2,00	14,30	13,80	13,30	25
10	69,30	68,70	68,30	2,00	14,30	13,80	13,30	25
11	69,30	68,70	68,30	2,00	14,30	13,80	13,30	25
12	69,30	68,70	68,30	2,00	14,30	13,80	13,30	25
13	69,30	68,70	68,30	2,00	14,30	13,80	13,30	25
14	69,30	68,70	68,30	2,00	14,30	13,80	13,30	25
15	69,30	68,70	68,30	2,00	14,30	13,80	13,30	25
16	69,30	68,70	68,30	2,00	14,30	13,80	13,30	25
17	69,30	68,70	68,30	2,00	14,30	13,80	13,30	25
18	69,30	68,70	68,30	2,00	14,30	13,80	13,30	25
19	69,30	68,70	68,30	2,00	14,30	13,80	13,30	25
20	69,30	68,70	68,30	2,00	14,30	13,80	13,30	25
21	69,30	68,70	68,30	2,00	14,30	13,80	13,30	25
22	69,30	68,70	68,30	2,00	14,30	13,80	13,30	25
23	69,30	68,70	68,30	2,00	14,30	13,80	13,30	25
24	69,30	68,70	68,30	2,00	14,30	13,80	13,30	25
25	69,30	68,70	68,30	2,00	14,30	13,80	13,30	25
26	69,30	68,70	68,30	2,00	14,30	13,80	13,30	25
27	69,30	68,70	68,30	2,00	14,30	13,80	13,30	25



Radios de curvatura del rodillo y de la pieza.



## Anexos 3

Tabla 3. Tensiones de proporcionalidad

Tensiones de proporcionalidad										
No	a	500	1500	2500	No	a	500	1500	2500	np
1	0,030	155,63	269,55	347,99	42	0,038	193,89	335,82	433,55	0,06
2	0,033	170,28	294,93	380,75	43	0,039	202,20	350,23	452,14	0,06
3	0,035	177,93	308,18	397,86	44	0,039	202,20	350,23	452,14	0,06
4	0,035	177,93	308,18	397,86	45	0,041	210,75	365,03	471,25	0,06
5	0,035	177,93	308,18	397,86	46	0,043	219,52	380,22	490,87	0,06
6	0,036	185,80	321,81	415,45	47	0,043	219,52	380,22	490,87	0,06
7	0,036	185,80	321,81	415,45	48	0,043	219,52	380,22	490,87	0,06
8	0,036	185,80	321,81	415,45	49	0,038	193,89	335,82	433,55	0,06
9	0,038	193,89	335,82	433,55	50	0,039	202,20	350,23	452,14	0,06
10	0,039	202,20	350,23	452,14	51	0,041	210,75	365,03	471,25	0,06
11	0,039	202,20	350,23	452,14	52	0,039	202,20	350,23	452,14	0,06
12	0,041	210,75	365,03	471,25	53	0,041	210,75	365,03	471,25	0,06
13	0,038	193,89	335,82	433,55	54	0,043	219,52	380,22	490,87	0,06
14	0,038	193,89	335,82	433,55	55	0,036	185,80	321,81	415,45	0,06
15	0,039	202,20	350,23	452,14	56	0,038	193,89	335,82	433,55	0,06
16	0,036	185,80	321,81	415,45	57	0,039	202,20	350,23	452,14	0,06
17	0,036	185,80	321,81	415,45	58	0,041	210,75	365,03	471,25	0,06
18	0,038	193,89	335,82	433,55	59	0,043	219,52	380,22	490,87	0,06
19	0,039	202,20	350,23	452,14	60	0,043	219,52	380,22	490,87	0,06
20	0,039	202,20	350,23	452,14	61	0,043	219,52	380,22	490,87	0,06
21	0,039	202,20	350,23	452,14	62	0,043	219,52	380,22	490,87	0,06
22	0,036	185,80	321,81	415,45	63	0,043	219,52	380,22	490,87	0,06
23	0,036	185,80	321,81	415,45	64	0,043	219,52	380,22	490,87	0,06
24	0,036	185,80	321,81	415,45	65	0,043	219,52	380,22	490,87	0,06
25	0,038	193,89	335,82	433,55	66	0,043	219,52	380,22	490,87	0,06
26	0,038	193,89	335,82	433,55	67	0,043	219,52	380,22	490,87	0,06
27	0,038	193,89	335,82	433,55	68	0,043	219,52	380,22	490,87	0,06
28	0,039	202,20	350,23	452,14	69	0,043	219,52	380,22	490,87	0,06
29	0,041	210,75	365,03	471,25	70	0,041	210,75	365,03	471,25	0,06
30	0,041	210,75	365,03	471,25	71	0,041	210,75	365,03	471,25	0,06
31	0,036	185,80	321,81	415,45	72	0,041	210,75	365,03	471,25	0,06
32	0,038	193,89	335,82	433,55	73	0,041	210,75	365,03	471,25	0,06
33	0,038	193,89	335,82	433,55	74	0,041	210,75	365,03	471,25	0,06
34	0,038	193,89	335,82	433,55	75	0,041	210,75	365,03	471,25	0,06
35	0,039	202,20	350,23	452,14	76	0,041	210,75	365,03	471,25	0,06
36	0,039	202,20	350,23	452,14	77	0,043	219,52	380,22	490,87	0,06
37	0,039	202,20	350,23	452,14	78	0,041	210,75	365,03	471,25	0,06
38	0,041	210,75	365,03	471,25	79	0,043	219,52	380,22	490,87	0,06
39	0,041	210,75	365,03	471,25	80	0,043	219,52	380,22	490,87	0,06
40	0,036	185,80	321,81	415,45	81	0,043	219,52	380,22	490,87	0,06
41	0,036	185,80	321,81	415,45						0,06



## Anexos 4

Tabla 4. Tensiones máximas

	500,00	1500,00	2500,00
1	470,44	525,97	661,25
2	470,44	525,97	661,25
3	470,44	525,97	661,25
4	470,44	525,97	661,25
5	470,44	525,97	661,25
6	470,44	525,97	661,25
7	470,44	525,97	661,25
8	470,44	525,97	661,25
9	470,44	525,97	661,25
10	470,44	525,97	661,25
11	470,44	525,97	661,25
12	470,44	525,97	661,25
13	470,44	525,97	661,25
14	470,44	525,97	661,25
15	470,44	525,97	661,25
16	470,44	525,97	661,25
17	470,44	525,97	661,25
18	470,44	525,97	661,25
19	470,44	525,97	661,25
20	470,44	525,97	661,25
21	470,44	525,97	661,25
22	470,44	525,97	661,25
23	470,44	525,97	661,25
24	470,44	525,97	661,25
25	470,44	525,97	661,25
26	470,44	525,97	661,25
27	470,44	525,97	661,25